



Catarina Veloso Reis

Licenciada em Ciências da Natureza (Biologia e Geologia)

Emissões de CO₂ e Aquecimento Global

Desenvolvimento de tecnologias de captura e armazenamento de CO₂

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Energia e Bioenergia

Orientador: Professora Doutora Benilde Simões Mendes

Presidente: Prof. Doutora Maria Paula Amaro de Castilho Duarte – FCT/UNL
Vogais: Prof. Doutora Ana Luísa Almaça da Cruz Fernando – FCT/UNL
Prof. Doutora Benilde Simões Mendes – FCT/UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Julho 2013

Emissões de CO₂ e Aquecimento Global
Desenvolvimento de tecnologias de captura e armazenamento de CO₂

©CATARINA VELOSO REIS

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Dedico esta dissertação à minha Família

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora Professora Doutora Benilde Mendes, Professora Associada da FCT-UNL e Presidente do DCTB da FCT-UNL, pela intensa disponibilidade e interesse demonstrado e pelo apoio constante durante todo o processo construtivo da minha dissertação.

A todos os docentes que lecionaram neste mestrado.

Ao meu pai, à minha irmã e avó, pelo modo estimulante com que me incentivaram e pela sua paciência nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos pelo apoio, incentivo, amizade e compreensão.

RESUMO

A utilização de energia é responsável por cerca de 60% de todas as emissões de gases com efeito de estufa, fazendo com que as alterações climáticas resultantes dessa utilização se tornem na principal preocupação para o sector energético. Com o emergir das economias de países em desenvolvimento, a procura de energia pode duplicar ou triplicar durante as próximas décadas. A implementação de novas ações políticas, com o intuito de aumentar a eficiência energética mundial, permitirá um maior crescimento económico sustentável, uma maior segurança energética e uma redução das emissões de CO₂.

Para além destas novas políticas de eficiência energética é necessário implementar várias medidas de mitigação às alterações climáticas, que muitos cientistas acreditam ser uma consequência direta do atual consumo energético. O principal objetivo da ação de mitigação é a diminuição do potencial efeito do aquecimento global, através da limitação das emissões de CO₂ atuais e futuras e também através do desenvolvimento de potenciais sumidouros de CO₂. A tecnologia de captura e armazenamento de CO₂ é a que atualmente poderá fazer diferença nos sectores industriais, na medida em que permitirá alcançar os objetivos de redução drástica das emissões de CO₂.

O presente trabalho visa enquadrar a problemática do consumo e da procura de energia da nossa sociedade atual com os aumentos das emissões de CO₂ e o consequente aquecimento global. Visa também apresentar a pesquisa inovadora, o desenvolvimento e a implementação das tecnologias de captura e armazenamento de CO₂, no mundo.

A utilização dos combustíveis fósseis não vai diminuir num futuro próximo, torna-se assim imperativo criar igualdades de mercado para que outras fontes de energia se tornem competitivas. Os governos terão um papel determinante para se conseguir fazer a passagem para um sistema energético que tenha por base a utilização de energias limpas.

Palavras-Chave: Consumo, Eficiência Energética, Alterações Climáticas, CO₂, Mitigação, CAC.

ABSTRACT

Energy use is responsible for about 60% of all greenhouse gas emissions, causing climate changes arising from such use to become the main concern for the energy sector. With the emerging economies of developing countries, energy demand could double or triple over the next decades. The implementation of new policy actions, in order to increase energy efficiency worldwide, will allow a greater sustainable economic growth, a greater energy security and a reduction in CO₂ emissions.

In addition to these new energy efficiency policies, it is necessary to implement various mitigation measures on climate changes, which many scientists believe to be a direct consequence of the current energy consumption. The main objective of the mitigation action is to decrease the potential effect of global warming, by reducing current and future CO₂ emissions and through the development of potential CO₂ sinks. The CO₂ capture and storage technology is the one that currently may make a difference in the industrial sectors, to the extent that it will achieve the objectives of drastic reduction of CO₂ emissions.

The present work aims to frame the issue of energy consumption and demand of our current society with the increase of CO₂ emissions and consequent global warming. It also presents innovative researches, developments and implementations of CO₂ capture and storage technologies around the world.

The use of fossil fuels will not decrease in the near future. Hence it becomes imperative to create an equal market for other energy sources to become competitive. Governments have a key role in order to achieve the transition to an energy system that is built on the use of clean energy.

Keywords: Consumption, Energy Efficiency, Climate Change, CO₂, Mitigation, CCS.

ÍNDICE DE CONTEÚDOS

1	Introdução	1
2	Consumo de energia e a sua problemática	3
2.1	O consumo de energia no Mundo	4
2.2	Consumo de energia na Europa.....	7
2.2.1	Dependência energética.....	8
2.2.2	Intensidade Energética	12
3	Alterações Climáticas.....	27
3.1	Institucionalização Internacional das Alterações Climáticas	27
3.1.1	Protocolo de Quioto	29
3.1.2	Acordo de Copenhaga	30
3.2	Aquecimento Global	31
3.3	Gases de Efeito de Estufa.....	34
3.3.1	Diferenciação entre Clima e Tempo.....	34
3.3.2	Efeito de Estufa	35
3.3.3	Ciclo Global do CO ₂	37
3.3.4	Aumento do CO ₂ antropogénico na Atmosfera.....	38
4	Estado de Arte	41
4.1	Medidas de Mitigação para as Alterações Globais.....	42
4.2	Tecnologias de Captura e Armazenamento de CO ₂ (CAC)	44
4.2.1	Opções de Captura de CO ₂	45
4.2.2	Técnicas de Captura de CO ₂	50
4.2.3	Transporte de CO ₂	57
4.2.4	Armazenamento de CO ₂	58
4.3	Aplicações das Tecnologias de CAC	65
4.3.1	Projetos CAC.....	65
4.3.2	Estratégias Nacionais	67
4.3.3	Projetos CAC em Portugal	68
4.3.4	Oportunidades de Sequestro em Portugal	70
5	Conclusões	73
6	Novas Tecnologias	77
	Bibliografia	79

ÍNDICE DE IMAGENS

Figura 2.1: Fornecimento de energia primária no mundo, de 1971-2008. Fonte [19] [20].	5
Figura 2.2: Dependência energética, todos os produtos, 2010 (%). Eurostat (online data code: nrg_100a); [25].	9
Figura 2.3: Dependência energética do carvão e derivados, 2010 (%). Eurostat (online data code: nrg_101a); [25].	10
Figura 2.4: Dependência energética do petróleo, UE-27 (%). Eurostat (online data code: nrg_102a); [25].	11
Figura 2.5: Dependência energética do gás natural, 2010 (%). Eurostat (online data code: nrg_103a); [25].	12
Figura 2.6: Intensidade energética, 2010 (Kgoe/1000€). Eurostat (online data code: tsien020); [25].	13
Figura 2.7: Produção primária de energia por combustível, UE-27 (Mtoe). Fonte: Eurostat (online data code: nrg_100a, nrg_101a, nrg_102a, nrg_103a, nrg_104a, nrg_1071a); [25].	13
Figura 2.8: Produção primária de energia por combustível, UE-27 (Mtoe). Fonte: [22].	14
Figura 2.9: Produção Primária e Consumo Interno Bruto, por combustível, UE-27. Fonte: [25].	15
Figura 2.10: Produção Primária e Consumo Interno Bruto, por combustível, UE-27. Fonte: [22].	16
Figura 2.11: Importações de diferentes tipos de combustíveis, por país de origem. Adaptada a partir de Eurostat [25] (online data code: nrg_122a; nrg_123a; nrg_124a).	17
Figura 2.12: Importações de combustíveis sólidos e petróleo, em 2010 (Mt). Eurostat (online data code: nrg_101a; nrg_102a); [25].	18
Figura 2.13: Importações de gás natural, 2010 (PJ). Eurostat (online data code: nrg_103a); [25].	19
Figura 2.14: Importações de eletricidade, 2010 (TWh). Eurostat (online data code: nrg_105a); [25].	20
Figura 2.15: Geração de energia elétrica na UE-27, em TWh. Eurostat; [22].	20
Figura 2.16: Consumo final de energia, por setor, UE-27 (Mtoe). Fonte: Eurostat (online data code: nrg_100a); [25].	22
Figura 2.17: Consumo final de energia na indústria, por combustível, UE-27 (Mtoe). Fonte: Eurostat (online data code: nrg_100a; nrg_101a; nrg_102a; nrg_103a; nrg_105a; nrg_106a; nrg_1071a); [25].	23
Figura 2.18: Consumo final de energia nos setores dos transportes, por combustível, UE-27 (Mtoe). Fonte: Eurostat (online data code: nrg_100a; nrg_102a; nrg_1073a); [25].	23
Figura 2.19: Emissões de gases de efeito de estufa por setor, em milhões de toneladas de CO ₂ equivalente, na UE-27; Fonte: [22]; [26]; [27].	25
Figura 3.1: Estimativa do balanço médio energético terrestre global e anual. Fonte: [3].	35
Figura 3.2: Modelo idealizado do efeito de estufa natural. Fonte: [3].	36
Figura 3.3: Fontes e sumidouros de CO ₂ na camada limite da litosfera-troposfera. Adaptado de http://www.biomind.de/realCO2/ .	37
Figura 3.4: Aumento da concentração de CO ₂ atmosférico. Fonte: [45].	39
Figura 3.5: Anomalias anuais de temperaturas globais e registo de CO ₂ . Fonte: [47].	39
Figura 3.6: Medição da Temperatura global de superfície. Fonte: [45].	40
Figura 4.1: Esquema do sistema de captura de pré-combustão. Fonte: [100].	45
Figura 4.2: Esquema para a captura pós-combustão. Fonte: [100].	46
Figura 4.3: Esquema para a oxi-combustão. Fonte: [100].	47
Figura 4.4: Sistema Looping-Químico de Combustão. Adaptado de [101].	49
Figura 4.5: Opções tecnológicas para a captura e separação de CO ₂ . Adaptado de [103].	50
Figura 4.6: Esquema de um típico sistema de absorção química. Fonte: [102].	51
Figura 4.7: Membrana de Absorção de Gás. Adaptado de [100].	55
Figura 4.8: Membrana de Separação de Gás. Adaptado de [100].	56
Figura 4.9: Configuração de reatores para o cultivo de microalgas: a) lagoas raceway; b) reator air-lift; c) reator de coluna de bolhas; d) reator tubular horizontal. Fonte: [115].	64
Figura 4.10: Desenvolvimento Global CAC de 2010-2050 por região. Fonte: [124] [121].	66
Figura 6.1: Captura de CO ₂ diretamente do ar através de um processo químico denominado 'scrubbing'. Fonte: [90].	77

ÍNDICE DE TABELAS

<i>Tabela 2.1: Produção de energia primária no mundo, de 2000-2009. Fonte: [21].</i>	5
<i>Tabela 2.2: Geração Bruta de Eletricidade Mundial, 2009. Fonte: [21].</i>	6
<i>Tabela 2.3: Dependência energética, todos os produtos, UE-27 (%). Eurostat (online data code: nrg_100a); [25].</i>	8
<i>Tabela 2.4: Dependência energética do carvão e derivados, UE-27 (%). Eurostat (online data code: nrg_101a); [25].</i>	9
<i>Tabela 2.5: Dependência energética do petróleo, 2010 (%). Eurostat (online data code: nrg_102a); [25].</i>	10
<i>Tabela 2.6 : Dependência energética do gás natural, EU-27 (%). Eurostat (online data code: nrg_103a); [25].</i>	11
<i>Tabela 2.7: Intensidade energética, UE-27 (Kgoe/1000€). Eurostat (online data code: tsien020); [25].</i>	12
<i>Tabela 2.8: Índice de Intensidade energética, UE-27 (Kgoe/1000€). Eurostat (online data code: tsien020); [25].</i>	12
<i>Tabela 2.9: Produção primária de energia por combustível, UE-27 (Mtoe). Eurostat (online data code: nrg_100a, nrg_101a, nrg_102a, nrg_103a, nrg_104a, nrg_1071a); [25].</i>	14
<i>Tabela 2.10: Consumo Interno Bruto, por combustível, UE-27 (Mtoe). Eurostat (online data code: nrg_100a; nrg_101a; nrg_102a; nrg_103a; nrg_104a; nrg_1071a); [25].</i>	16
<i>Tabela 2.11: Importações de combustíveis sólidos e petróleo, UE-27 (Mt). Eurostat (online data code: nrg_101a; nrg_102a); [25].</i>	17
<i>Tabela 2.12: Importações de gás natural, UE-27 (PJ). Eurostat (online data code: nrg_103a); [25].</i>	18
<i>Tabela 2.13: Importações de eletricidade, UE-27 & Top5 Importadores e Exportadores. Eurostat (online data code: nrg_105a); [25].</i>	19
<i>Tabela 2.14: Consumo final de energia, por setor, UE-27 (Mtoe). Fonte: Eurostat (online data code: nrg_100a); [25].</i>	21
<i>Tabela 2.15: Consumo final de energia na indústria, por combustível, UE-27 (Mtoe). Fonte: Eurostat (online data code: nrg_100a; nrg_101a; nrg_102a; nrg_103a; nrg_105a; nrg_106a; nrg_1071a); [25].</i>	22
<i>Tabela 2.16: Consumo final de energia no setor de transporte, por combustível, UE-27 (Mtoe). Fonte: Eurostat (online data code: nrg_100a; nrg_102a; nrg_1073a); [25].</i>	24
<i>Tabela 4.1: Comparação de benefícios para as tecnologias de pós-combustão, pré-combustão e oxi-combustão. Adaptado de [103].</i>	48
<i>Tabela 4.2: Comparação de Centrais de energia com e sem a captura de CO₂. Adaptado de [104].</i>	48
<i>Tabela 4.3: Capacidade de armazenamento de CO₂ nas diferentes opções de armazenamento geológico. Fonte: [103].</i>	59

SÍMBOLOS E NOTAÇÕES

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
atm	atmosfera
CA	Anidrase Carbónica
CAC	Captura e Armazenamento de Carbono
CCGI	Ciclo Combinado de Gaseificação Integrada
CCGT	Combined Cycle Gas Turbine
CDM	Clean Development Mechanism
CER	Redução de Emissões Certificada
CELE	Comércio Europeu de Licenças de Emissões
CGS	CO₂ Geologic Storage
CH₄	Metano
CO₂	Dióxido de Carbono
CO	Monóxido de Carbono
COP	Conferência de Partidos
CPU	Unidade de Purificação Criogénica
DEA	Dietanol Amida
DIPA	Di-2-propanolamina
EC	European Commission
ECBM	Enhanced Coal Bed Methane
EDP	Eletricidade De Portugal
EEA	European Environment Agency
EERP	Despesa Europeia de Estímulo Económico
EGR	Enhanced Gas Recovery
EOR	Enhanced Oil Recovery
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
ESA	Electrical Swing Adsorption
EUA	Estados Unidos da América
FPC	Fundo Português de Carbono
GEE	Gases com Efeito de Estufa
GISS	Goddard Institute for Space Studies
GPL	Gases de Petróleo Liquefeito
GWh	GigaWatt hora
G8	Forum for the governments of eight of the world's eleven largest national economies
G20	Group of Twenty Finance Ministers and Central Bank

	Governors
H₂	Hidrogénio
H₂O	Água
IEA	International Energy Agency
ICSU	Conferência Mundial do Clima
IGBP	Programa Internacional Geosfera-Biosfera
IHDP	Programa Internacional sobre as Dimensões Humanas das Alterações Globais do Ambiente
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KOH	Hidróxido de Potássio
LQC	Looping Químico de Combustão
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
MDEA	N-metildietanolamina
MEA	Monoetanolamina
Mton	Megatonelada
Mtoe	Megatonelada por petróleo equivalente
MWh	Megawatt hora
MW	Megawatt
N₂	Azoto
N₂O	Óxido Nitroso
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NaOH	Hidróxido de Sódio
NEAA	Netherlands Environment Assessment Agency
NO_x	Óxidos de Azoto
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administrations
O₂	Oxigénio
OCED	Organização para Cooperação Económica e Desenvolvimento
PEO	Óxido de poliéster
PNAC	Programa Nacional para as Alterações Climáticas
PNAEE	Plano Nacional de Acção para Eficiência Energética
PNAEE	Plano Nacional de Acção para as Energias Renováveis
POLES	Prospective Outlook for the Long Term Energy System
ppm	Partes por milhão
PRIMES	Estimativas do Balanço Energético na Europa
PSA	Pressure Swing Adsorption

PTM	Pesquisa Tecnológica de Membranas
PUP	Planet Under Pressure
QREN	Quadro de Referência Estratégica Nacional
REN	Redes Energéticas Nacionais
RNBC	Roteiro Nacional de Baixo Carbono
SO₂	Dióxido Enxofre
SO₃	Trióxido de Enxofre
TSA	Temperature Swing Adsorption
UE	União Europeia
UE-27	27 países membros da União Europeia
UNEP	United Environment Programme
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
WCRP	Programa de Investigação Mundial do Clima
WEO	World Energy Outlook
WEM	World Energy Model
WGS	‘Water-Gas-Shift’

1 INTRODUÇÃO

A energia é um mecanismo primário e fundamental para o desenvolvimento económico, assim como para atingir os objetivos de um desenvolvimento sustentável. A massificação da produção e consumo, o uso crescente de recursos naturais, o crescimento da população global, a tendência mundial do aumento da esperança de vida e o aumento do crescimento económico, são tudo fatores responsáveis pelo aumento da procura de energia. O aumento do consumo energético, a nível global, deve-se em grande parte ao desenvolvimento das sociedades humanas durante os séculos XX e XXI, e tem provocado um aumento drástico das emissões dos gases com efeito de estufa (GEE) [1] [2] [3].

Atualmente as principais fontes energéticas provêm da queima de combustíveis fósseis (carvão mineral, petróleo, gás natural). Como principal consequência desse consumo, as sociedades humanas interagem com o sistema da Terra de maneiras tão profundas e prolongadas que ameaçam os seus vários subsistemas e respetivos processos bióticos e abióticos de que depende a sustentabilidade dessas mesmas sociedades [4].

As alterações climáticas têm ocorrido ao longo de milhares de anos no nosso planeta, e continuarão a ocorrer enquanto o nosso planeta se mantiver ativo. Contudo a questão que se coloca é que, para além dessas alterações climáticas provenientes de causas naturais alia-se o facto de estas se encontrarem atualmente amplificadas devido a causas antropogénicas. O ritmo destas alterações climáticas tem vindo a sofrer um forte aceleração e a tendência é que tome proporções cada vez maiores se não forem tomadas medidas de mitigação adequadas [5] [6].

O sector energético é responsável por vários impactes ambientais, sendo as mais discutidas atualmente as alterações no sistema climático e o consequente aquecimento global. Os principais responsáveis por estas alterações climáticas são os gases denominados como gases com efeito de estufa, nomeadamente o dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de azoto (NO_2), metano e compostos orgânicos voláteis. O dióxido de carbono (CO_2) é considerado como sendo o principal responsável pelo aumento do efeito de estufa. No que toca a controlar os impactes ambientais dos diversos sistemas de energias enfrentamos um grande problema, quando se fala em emissões, resíduos e perturbações dos ecossistemas. Nesta matéria, a emissão de dióxido de carbono (CO_2), principalmente devido à utilização de combustíveis fósseis e os seus impactes ambientais, têm vindo cada vez mais a transformar-se em importantes questões científicas e políticas [7] [3] [6].

O panorama mundial de energia está a sofrer mudanças e as potenciais consequências são vastas para os mercados e o comércio da energia. A implementação de novas ações políticas, com o intuito de aumentar a eficiência energética mundial, permitirá um maior crescimento económico

sustentável, uma maior segurança energética e um menor consumo de combustíveis fósseis, resultando numa diminuição de emissões de GEE e principalmente CO₂, na atmosfera [8].

Contudo, até a data tem sido muito difícil colocar o sistema global de energia num caminho mais sustentável e, com o grande desenvolvimento que se tem vindo a observar em países como a China, Índia e Médio Oriente, prevê-se que a procura mundial de energia cresça mais de 1/3 até 2035. A tendência é que os combustíveis fósseis continuem a ser a fonte primária de energia global, com um total de 532 mil milhões de dólares de subsídios em 2011, cerca de 30% mais que em 2012 e cerca de seis vezes mais que os subsídios para as fontes de energias renováveis [8].

De acordo com a literatura corrente, é imperativo diminuir as emissões de CO₂ se se quiser limitar a subida da temperatura de superfície global em 2°C, dentro dos limites estabelecidos pelo Protocolo de Quioto. Uma das grandes apostas é a implementação e desenvolvimento de tecnologias de captura e armazenamento de carbono. Contudo, esta tecnologia continua a ser implementada a um passo muito aleatório e lento, existindo somente alguns projetos operacionais a nível comercial [9] [8] [10].

Perante este cenário, é urgente despertar a consciência de cada indivíduo para este consumo elevado de energia, cujas consequências imprevisíveis irão afetar não só o ambiente mas também a nossa sociedade num futuro próximo.

O presente trabalho visa assim discutir a problemática do consumo de energia mundial, falar das alterações climáticas modernas e consequências dessas alterações no ambiente e na sociedade humana, no presente e num futuro próximo, focar umas das principais consequências dessas alterações climáticas que é o aumento da temperatura de superfície global (aquecimento global) e as suas causas, dando mais ênfase às causas antropogénicas como o aumento dos gases com efeito de estufa e o aumento do CO₂ na atmosfera. Por fim, o capítulo do Estado-da-Arte visa apresentar as diversas medidas de mitigação que têm vindo a ser propostas e o desenvolvimento e implementação que se tem feito relativamente às tecnologias de captura e armazenamento de CO₂, na Europa e em Portugal.

2 CONSUMO DE ENERGIA E A SUA PROBLEMÁTICA

A Revolução Industrial caracteriza-se pelo desenvolvimento da ciência moderna, e de novas tecnologias, cujas aplicações se estendem aos mais diversos domínios de atividades. É caracterizada também pelo aumento e uso intensivo de combustíveis fósseis. Primeiro foi o carvão natural, seguido pelo petróleo a partir da segunda metade do século XIX, e finalmente o gás natural, na primeira metade do século XX. A exploração industrial do petróleo provocou profundas alterações ao nível da economia mundial e particularmente nas economias dos países desenvolvidos [3].

Há mais de um século que a energia fóssil tem vindo a apoiar a industrialização de muitos países e os padrões de vida dos seus habitantes. No entanto, um elevado número de questões e desafios sobre os seus efeitos no ambiente, são suscetíveis de alterar a forma como a energia será fornecida e usada, já neste século. À medida que se foi desenvolvendo uma consciência sobre as questões ambientais, também se foi constatando que o consumo de energia continua a causar degradação ambiental, incluindo a poluição do ar, da água e do solo. O efeito ambiental global do consumo de energia, sobre as alterações climáticas, parece constituir uma ameaça grave sem solução fácil [11] [12]. Sem a introdução a curto prazo de medidas de apoio e políticas eficazes, por parte dos governos, as emissões de gases com efeito de estufa (GEE) relacionadas com a produção e utilização de energia, nomeadamente da queima de combustíveis fósseis, apresentam uma tendência de aumento de mais de 50%, de 26,1 GtCO₂eq (7,1GtC) em 2004 a 37-40GtCO₂eq (10,1-10,9GtC) até 2030. Estima-se que as emissões de CO₂, entre 2000 e 2030, com origem no sector energético, aumentem entre 45% a 110% [3].

Toda e qualquer produção de energia antropogénica têm implicações a nível ambiental, sendo o consumo dessa energia produzida responsável por uma grande parte da libertação de GEE na atmosfera terrestre. Atualmente o sector energético global é responsável por cerca de 80% das emissões de GEE, resultantes da produção, transformação, manipulação e consumo de energia [8] [7].

O principal objetivo de todas as transformações de energia é fornecer serviços de energia que melhorem a qualidade de vida (saúde, esperança de vida e conforto) e a produtividade [13] [14]. Cerca de 45% do consumo final de energia é usada sob a forma de calor de baixas temperaturas (aquecimento, secagem, cozinhar), cerca de 10% é utilizada para processos industriais de altas temperaturas, 15% para motores elétricos, iluminação e eletrónica e cerca de 30% é utilizada no sector dos transportes. Dependendo de variações regionais e sociais, a tendência é para uma maior procura de todas as formas de energia existentes atualmente, uma maior procura de serviços energéticos com energia sustentada, para responder à crescente expansão das economias e população mundial [8] [15].

A maior procura de energia *per capita* advém das populações que vivem nos países com economias que pertencem à Organização para Cooperação Económica e Desenvolvimento (OCED) [8]. As mil milhões de pessoas que vivem em países desenvolvidos (OCED) consomem atualmente cerca de metade dos 470EJ do uso de energia primária mundial anual [15] [8], enquanto cerca de 1,6 mil milhões de pessoas que vivem nos países em desenvolvimento mais pobres não têm acesso a serviços modernos de energia e consomem apenas cerca de 4%, principalmente sobre a forma tradicional de biomassa usada ineficazmente para aquecimento e para cozinhar [16]. A dinâmica dos mercados de energia é cada vez mais determinada por países fora da OCED. Os Países não membros da OCED são responsáveis por 90% do crescimento da população, 70% do aumento na produção económica e 90% do crescimento da procura de energia durante o período de 2010 a 2035 [15]. Em muitos países em desenvolvimento, a prestação de serviços energéticos adequada, acessível e confiável tem sido insuficiente para reduzir a pobreza e melhorar o nível de vida. O fornecimento de crescentes quantidades de energia limpa e segura vai ser um dos grandes desafios deste século e vai exigir uma grande inovação e investimento [17].

2.1 O consumo de energia no Mundo

O aumento da população mundial em cerca de 1,7 mil milhões de pessoas e um crescimento médio anual de 3,5% na economia global faz com que exista uma procura cada vez maior para os serviços de energia e mobilidade. É essencial, para um crescimento e desenvolvimento económico, que exista um sector energético que seja competitivo, de confiança e sustentável, sendo que o impulso para esse crescimento/desenvolvimento surge com a crescente dependência global que existe sobre a oferta de energia primária [18].

O fornecimento de energia primária no mundo aumentou para o dobro, entre 1971 e 2008, principalmente a energia primária proveniente de combustíveis fósseis (Figura 1). Em 2008, o fornecimento de energia primária a partir dos combustíveis fósseis foi 81% [19].

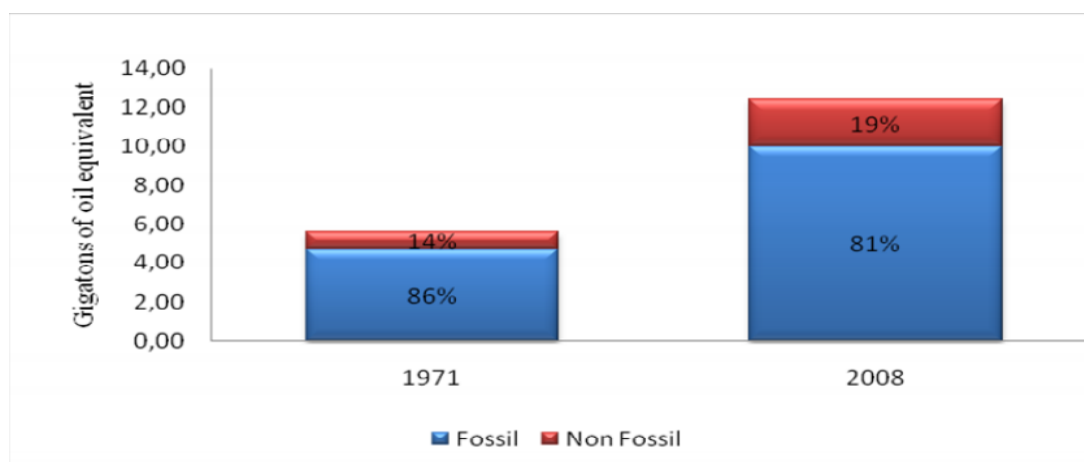


Figura 2.1: Fornecimento de energia primária no mundo, de 1971-2008. Fonte [19] [20].

De acordo com os dados estatísticos do relatório Eurostat [21], a produção de energia primária na UE-27 tem registado uma queda nos últimos dez anos, de 940,6 milhões de toneladas por petróleo equivalente (Mtoe) em 2000, para 830,9Mtoe em 2010. Entre 2009 e 2010, registou-se um ligeiro aumento, de 813,7Mtoe para 830,9Mtoe, respetivamente. Por sua vez, a produção de energia primária global, para o mesmo período, aumento 22,8%, de 9992,9Mtoe em 2000 para 12,268Mtoe em 2009. Os países membros G20, de 2000 a 2010, foram responsáveis por cerca de 72% da produção de energia no mundo, com a China, os EUA e a Rússia a registarem uma maior produção que a UE-27; a Índia, a Austrália e a Coreia do Sul registaram crescimentos acima da média mundial (Tabela 1).

Tabela 2.1: Produção de energia primária no mundo, de 2000-2009. Fonte: [21].

	Production (million toe)		Analysis by energy type (excluding heat), 2009 (%)				
	2000	2009	Coal and lignite	Crude oil	Natural gas	Nuclear energy	Renew- ables & waste
EU-27 ⁽¹⁾	940.6	830.9	19.6	11.7	18.8	28.5	21.4
Argentina	:	80.8	0.1	43.7	46.0	2.6	7.6
Australia ⁽²⁾	233.6	324.0	76.2	8.2	13.3	0.0	2.4
Brazil	148.3	230.3	1.0	45.1	4.3	1.5	48.1
Canada ⁽²⁾	372.7	395.8	8.1	40.1	34.7	6.0	11.1
China	1 064.0	2 084.9	73.8	9.1	3.4	0.9	12.8
India	366.4	502.5	48.6	7.7	7.7	1.0	35.1
Indonesia	236.3	351.8	47.4	13.7	19.1	0.0	19.9
Japan ⁽²⁾	105.8	95.1	0.0	0.8	3.7	77.7	17.8
Mexico ⁽²⁾	222.3	217.7	2.3	71.4	17.4	1.2	7.6
Russia	978.0	1 181.6	13.0	41.8	39.7	3.6	1.8
Saudi Arabia	:	528.4	0.0	88.4	11.6	0.0	0.0
South Africa	145.6	160.6	88.2	0.1	0.5	2.1	9.1
South Korea ⁽²⁾	34.4	44.6	2.6	1.6	1.0	86.9	7.7
Turkey ⁽²⁾	25.9	30.3	57.5	7.8	1.9	0.0	32.8
United States ⁽²⁾	1 667.3	1 740.9	31.4	20.0	28.4	12.8	7.4
World	9 992.9	12 268.2	28.1	32.5	20.6	5.7	13.2

⁽¹⁾ Data for 2010 instead of 2009.

⁽²⁾ Production total for 2010 instead of 2009.

No que diz respeito ao consumo interno bruto mundial, aquele relatório [21] demonstra que este aumentou 21%, de 10,031Mtoe em 2000 para 12,140Mtoe em 2009. O consumo interno bruto da União Europeia, após 3 anos de consumo em queda relacionado com a crise financeira e económica global, aumentou de 1,703Mtoe em 2009 para 1,759Mtoe em 2010. O consumo interno bruto da China mais que duplicou, os EUA e o Japão foram os membros dos G20 que registaram um consumo interno bruto mais baixo em 2010. O carvão e lenhite, o petróleo bruto e derivados, e o gás foram responsáveis por 80,9% do consumo global de energia, onde 1/4 foi do carvão e lenhite, 1/3 do petróleo bruto e derivados e 1/5 do gás. A nível mundial as energias renováveis e os resíduos representam 13,3% do consumo bruto.

Tabela 2.2: Geração Bruta de Eletricidade Mundial, 2009. Fonte: [21].

	Total	Analysis by source (%)						
	(GWh)	Coal and lignite	Oil	Gas	Nuclear	Hydro ⁽¹⁾	Other renewables & waste	Other
EU-27 ⁽²⁾	3 345 618	25.7	2.6	22.6	27.4	11.9	9.6	0.2
Argentina	122 347	2.3	10.4	51.1	6.7	28.0	1.4	0.0
Australia	260 965	77.9	1.0	13.7	0.0	4.7	2.6	0.0
Brazil	466 468	2.1	3.1	2.9	2.8	83.8	5.2	0.1
Canada	603 234	15.2	1.4	6.2	15.0	60.3	1.9	0.0
China	3 695 928	78.8	0.4	1.4	1.9	16.7	0.8	0.0
India	899 389	68.6	2.9	12.4	2.1	11.9	2.2	0.0
Indonesia	155 470	41.8	22.8	22.1	0.0	7.3	6.0	0.0
Japan	1 047 919	26.7	8.7	27.2	26.7	7.8	2.9	0.0
Mexico	261 018	11.3	17.5	53.1	4.0	10.2	3.9	0.0
Russia	991 980	16.5	1.6	47.3	16.5	17.8	0.3	0.0
Saudi Arabia	217 082	0.0	55.2	44.8	0.0	0.0	0.0	0.0
South Africa	249 557	93.0	0.0	0.0	5.1	1.7	0.1	0.0
South Korea	454 504	46.0	4.4	15.5	32.5	1.2	0.4	0.0
Turkey	194 813	28.6	2.5	49.3	0.0	18.5	1.2	0.0
United States	4 188 214	45.2	1.2	22.7	19.8	7.1	4.0	0.0
World	20 132 212	40.3	5.1	21.4	13.4	16.5	3.2	0.1

⁽¹⁾ Includes production from pumped hydro.

⁽²⁾ 2010.

De acordo com os dados do referido relatório [21], a geração bruta de eletricidade mundial foi de 20,1 milhões GWh em 2009, dos quais 84,5% foi gerada por membros G20. Em 2010, na UE-27, foi gerado um total de 3,3 milhões de GWh, um aumento de 4,3% comparativamente com 2009 (Tabela 2). Os EUA e a China registaram os maiores níveis de geração de energia elétrica entre os membros G20. As Centrais de carvão e lenhite são responsáveis por 2/5 da geração de eletricidade em todo o mundo, seguindo-se as centrais termoelétricas responsáveis por 1/5. As energias renováveis, em especial a hidroelétrica, e os resíduos foram responsáveis por 19,8% do fornecimento de eletricidade no mundo em 2009, a União Europeia registou valores ligeiramente superiores, de 21,5% em 2010.

Apesar da crise económica mundial, a procura global de energia primária recuperou cerca de 5% em 2010. De acordo com o Cenário Novas Políticas [15], a China fortalece a sua posição como maior consumidor mundial de energia, e em 2035 irá consumir quase 70% de energia a mais do que os EUA, o segundo maior consumidor, de notar que o consumo *per capita* de energia da China é ainda metade do consumo dos EUA. As taxas de crescimento no consumo de energia na Índia, Indonésia, Brasil e Médio Oriente são ainda mais rápidas do que na China. A utilização dos combustíveis fósseis continua a ter uma grande importância na produção de energia, apesar da sua participação no consumo global de energia primária ter registado uma ligeira queda, de 81% em 2010 para 75% em 2035 [15].

Na última década, o carvão satisfaz praticamente metade do aumento da procura mundial de energia, registando um aumento ainda mais acentuado do que as fontes de energias renováveis no seu conjunto. De acordo com o Cenário Novas políticas [8] a procura da China para o carvão atinge um pico em 2020, estabilizando em 2035, e por sua vez, a utilização de carvão por parte da Índia aumenta, até que em 2025 ultrapassa o dos EUA. Em relação ao gás natural, a procura por parte da China, Índia e Médio Oriente aumenta fortemente. O sector dos transportes faz com que a procura de petróleo suba de 87 milhões de barris por dia em 2010 para 99 milhões de barris por dia em 2035. A quota-parte da energia nuclear aumenta, passa de 6% em 2008 para 8% em 2035, por sua vez as energias hidroelétrica, eólica, solar, geotérmica e biomassa moderna e marítima, duplicam passando a sua quota-parte na demanda da energia primária total de 7% para 14% [20].

A contribuição mais importante para uma melhor eficiência energética global e, conseqüentemente, para se alcançar uma segurança energética advém da energia que não consumimos, isto é, de toda a energia que conseguimos poupar. Assim, em 2011, os principais países consumidores de energia anunciaram um conjunto de novas medidas com o objetivo de economizar energia: a China visa uma redução de 16% da intensidade energética até 2015; os EUA adotaram novas normas de economia energética; a UE comprometeu-se diminuir em 20% a sua procura de energia até 2020, e o Japão definiu objetivos de redução do seu consumo de eletricidade para 2030 [8].

2.2 Consumo de energia na Europa

Estamos perante uma nova era no que diz respeito à energia e ambiente na Comunidade Europeia. A atual agenda legislativa e regulamentar para a energia é indiscutivelmente mais ampla e complexa do que nunca, com propostas agora em discussão sobre as energias renováveis, qualidade do combustível, o mercado interno, o comércio de emissões e imensas questões relacionadas [22].

Entre os muitos desafios relacionados com a problemática da energia estão as alterações climáticas, que surgem como sendo um dos principais pilares das Políticas da União Europeia com o objetivo de acelerar a transição para uma energia sustentável. Como resposta a esse desafio a União Europeia cria o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) e em 2007 apresenta um

conjunto de medidas energia-clima, conhecido como o Pacote ‘20/20’. Este documento inclui como objetivos para 2020, a redução de GEE em 20%, melhorar a eficiência energética em 20%, alcançar uma cota de 20% em energias renováveis e uma cota de 10% em biocombustíveis [23] [24].

A UE é composta por um grupo de estados com enormes variações em muitos aspetos físicos e económicos do sistema energético. Políticas energéticas sólidas dependem de estatísticas de energia comparáveis e abrangentes, incluindo produção, consumo, comércio, preços, infraestruturas e dados relacionados ou complementares. Em tendências básicas de produção e de consumo, verifica-se que a União Europeia viu reduzida a sua produção primária em favor das importações. Assim, e como líder mundial na política energética e climática, a UE enfrenta o duplo desafio de viver face às suas ambições, enquanto ao mesmo tempo visa estimular os mercados globais para um futuro energeticamente sustentável [22].

2.2.1 Dependência energética

De acordo com os dados estatísticos do Eurostat [25], a UE-27 sofreu um aumento, no que diz respeito à dependência das importações de energia, de 46,7% em 2000 para 52,7% em 2010, correspondendo a um aumento de 6 pontos percentuais (Tabela 3).

Tabela 2.3: Dependência energética, todos os produtos, UE-27 (%). Eurostat (online data code: nrg_100a); [25].

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
EU-27	46.7	47.4	47.6	49.0	50.2	52.5	53.7	53.0	54.6	53.7	52.7

Entre 2009 e 2010, as maiores quedas das taxas de dependência energética foram registadas na Letónia com 41,6% em 2010 contra 58,8% em 2009, e a Estónia com 12,9% em 2010 contra 21,2% em 2009 [25] (Figura 2).

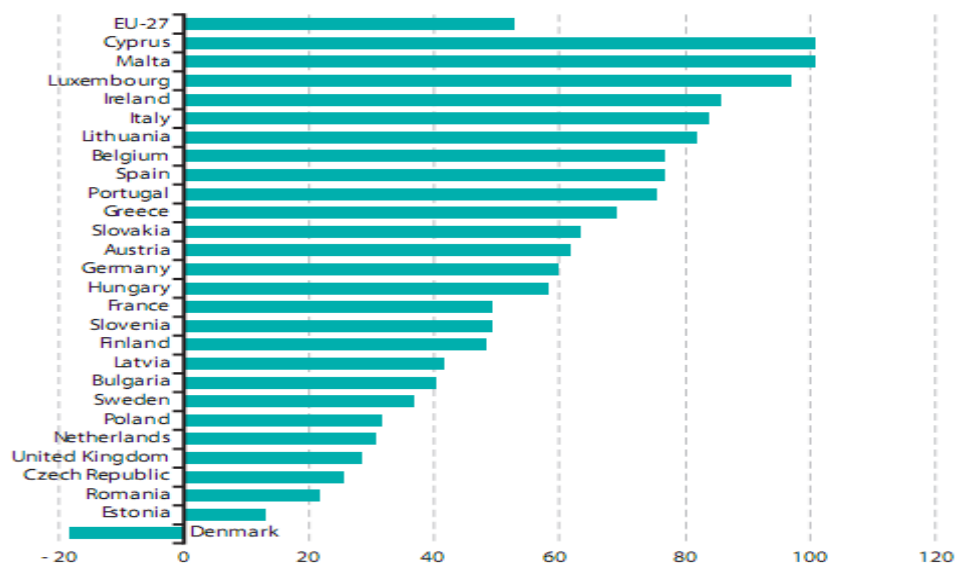


Figura 2.2: Dependência energética, todos os produtos, 2010 (%). Eurostat (online data code: nrg_100a); [25].

Entre 2000 e 2008, a dependência de carvão importado e derivados na UE-27 cresceu de 43,2% para 64,7%. De 2008 a 2010, estamos perante um decréscimo de aproximadamente 6 pontos percentuais, tendo chegado a 58,4% em 2010 [25] (Tabela 4).

Tabela 2.4: Dependência energética do carvão e derivados, UE-27 (%). Eurostat (online data code: nrg_101a); [25].

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
EU-27	43.2	48.2	48.0	50.1	54.6	56.4	58.3	58.8	64.7	62.2	58.4

Os únicos exportadores de carvão e derivados na UE-27 foram a República Checa e a Polónia, logo, em 2010, as suas taxas de dependência foram -50,1% e -6,5% respetivamente. Entre 2009 e 2010, a Estónia registou um aumento significativo da sua dependência, 132,6% em 2010 contra 4% em 2009 [25] (Figura 3).

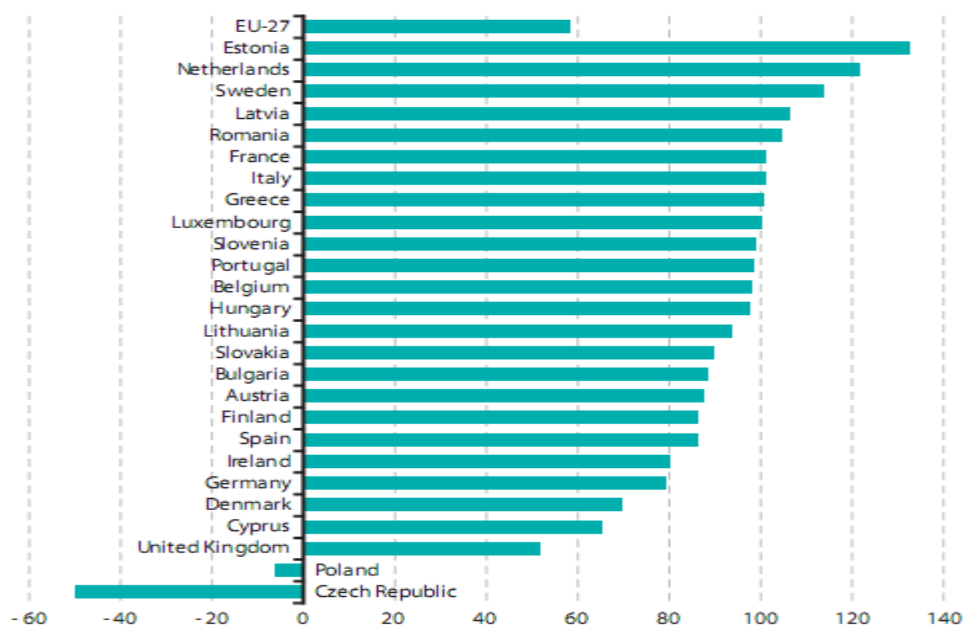


Figura 2.3: Dependência energética do carvão e derivados, 2010 (%). Eurostat (online data code: nrg_101a); [25].

Relativamente à dependência em importações de petróleo na UE-27, entre 2000 e 2010, esta cresceu 8,6 pontos percentuais, comparativamente ao carvão e ao gás natural a dependência do petróleo foi maior, cerca de 84,3% em 2010. Entre 2009 e 2010, a dependência do petróleo registou um ligeiro aumento de 1,2%. Por sua vez, e para o mesmo período de tempo, a dependência do carvão e gás natural diminuiu 4 e 2 pontos percentuais, respetivamente [25] (Tabela 5). Dezanove Estados Membros da UE-27 registaram taxas de dependência em importações de petróleo acima dos 90% em 2010. As menores taxas foram registadas no Reino Unido (14,9%), Roménia (51,3%) e Estónia (55,8%) [25] (Figura 4).

Tabela 2.5: Dependência energética do petróleo, 2010 (%). Eurostat (online data code: nrg_102a); [25].

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
EU-27	75.7	77.3	75.9	78.5	79.8	82.3	83.5	82.4	84.2	83.1	84.3

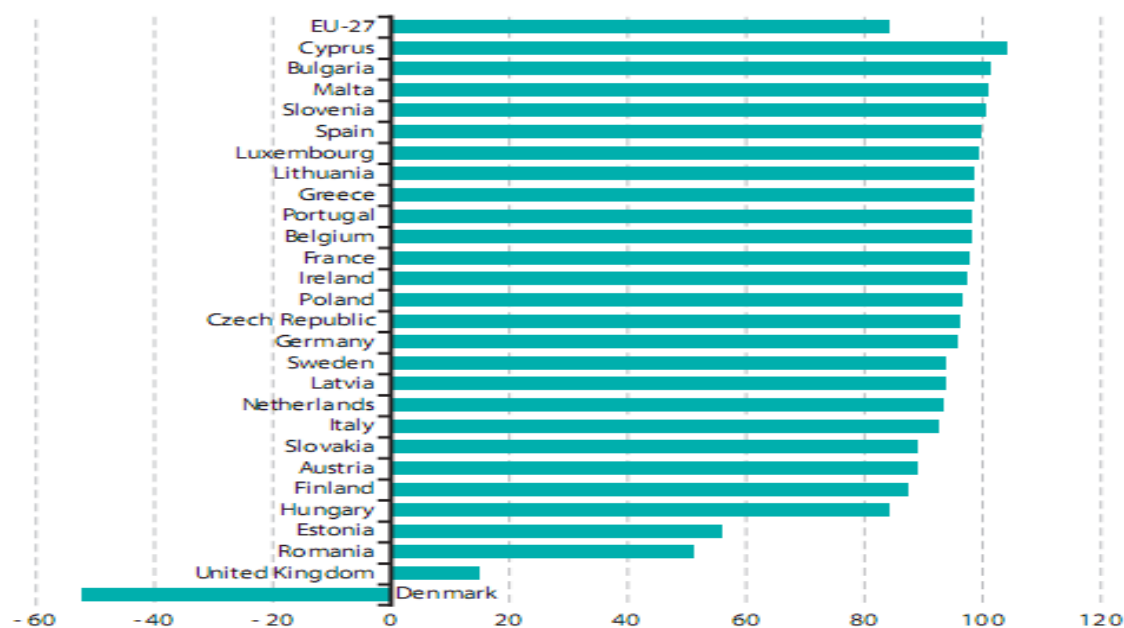


Figura 2.4: Dependência energética do petróleo, UE-27 (%). Eurostat (online data code: nrg_102a); [25].

Relativamente à dependência das importações do gás natural na UE-27, entre 2000 e 2010, houve um aumento de 13 pontos percentuais, de 48,9% em 2000 para 62,4% em 2010 [25] (Tabela 6). Em 2010, a menor taxa de dependência registada foi na Roménia, de 16,8% [25] (Figura 5)

Tabela 2.6 : Dependência energética do gás natural, EU-27 (%). Eurostat (online data code: nrg_103a); [25].

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
EU-27	48.9	47.2	51.1	52.4	54.0	57.7	60.8	60.3	62.3	64.3	62.4

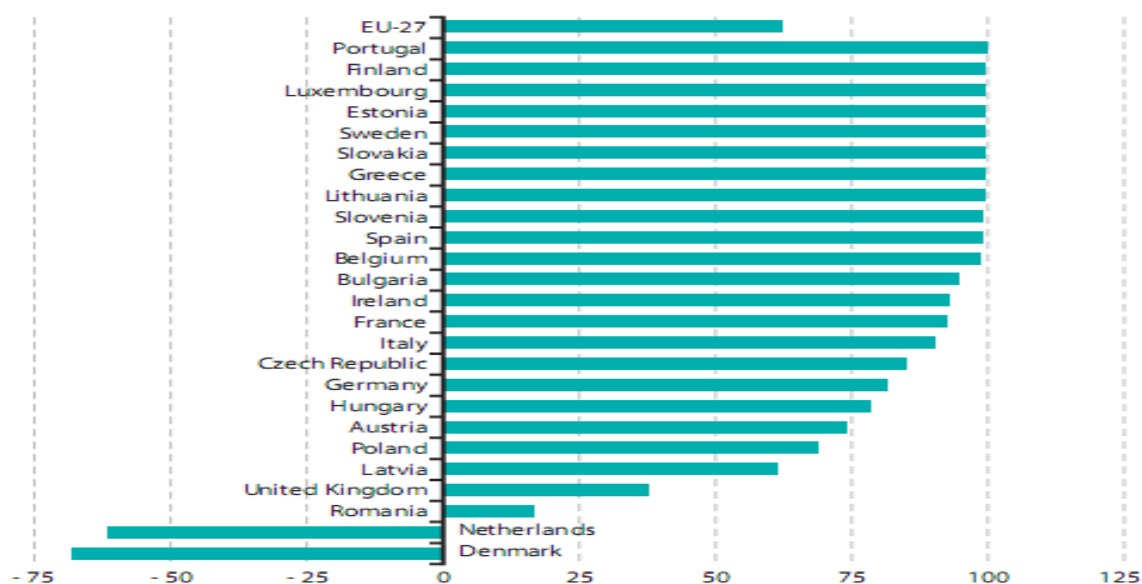


Figura 2.5: Dependência energética do gás natural, 2010 (%). Eurostat (online data code: nrg_103a); [25].

2.2.2 Intensidade Energética

De acordo com os dados estatísticos do Eurostat [25] a intensidade energética na EU-27 registou um decréscimo de 12% no período de tempo de 2000 a 2009 [25] (Tabela 7). Ainda assim, de 2009 a 2010, registou-se um aumento de 1,4% chegando a 168Kgoe€/1000 [25] (Tabela 8).

Tabela 2.7: Intensidade energética, UE-27 (Kgoe/1000€). Eurostat (online data code: tsien020); [25].

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
EU-27	187	188	185	187	184	181	176	169	168	166	168

Tabela 2.8: Índice de Intensidade energética, UE-27 (Kgoe/1000€). Eurostat (online data code: tsien020); [25].

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
EU-27	100.0	100.3	98.7	99.7	98.4	96.8	93.8	90.3	89.5	88.5	89.7

Na última década, todos os Estados Membros da UE-27, à exceção da Áustria, diminuíram as suas intensidades energéticas. As maiores quedas foram registadas na Eslováquia (-38%), Lituânia (-37%), Bulgária (-36%) e Roménia (-35%) [25] (Figura 6).

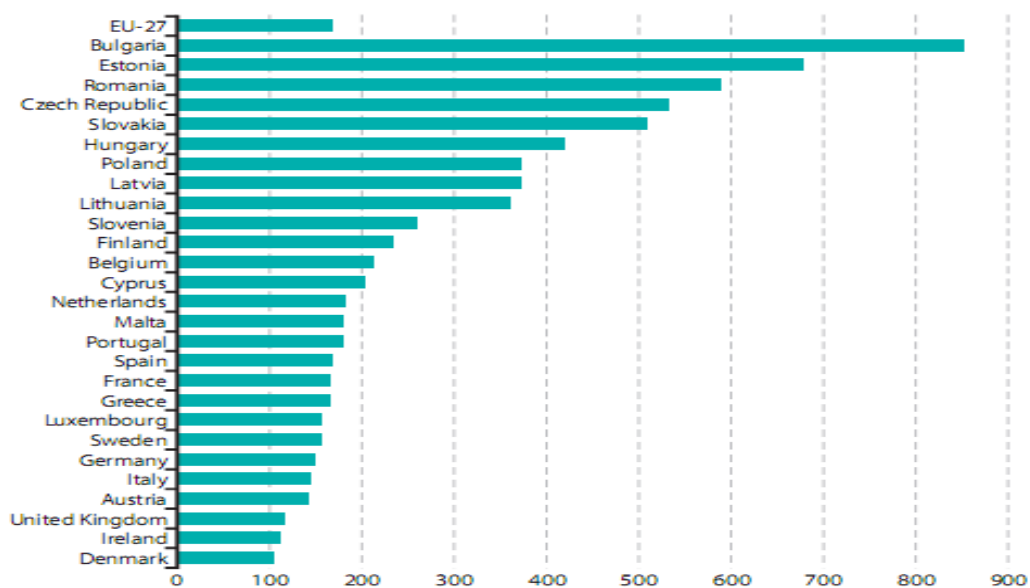


Figura 2.6: Intensidade energética, 2010 (Kgoe/1000€). Eurostat (online data code: tsien020); [25].

No que diz respeito às tendências básicas de produção e consumo de energia, verifica-se que a União Europeia reduziu a produção primária em função das importações [25] (Figura 7 e Figura 8).

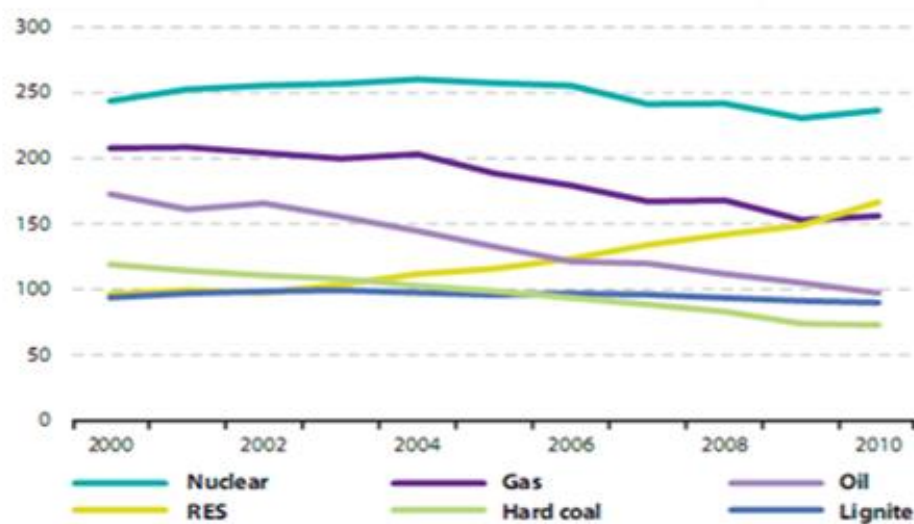


Figura 2.7: Produção primária de energia por combustível, UE-27 (Mtoe). Fonte: Eurostat (online data code: nrg_100a, nrg_101a, nrg_102a, nrg_103a, nrg_104a, nrg_1071a); [25].

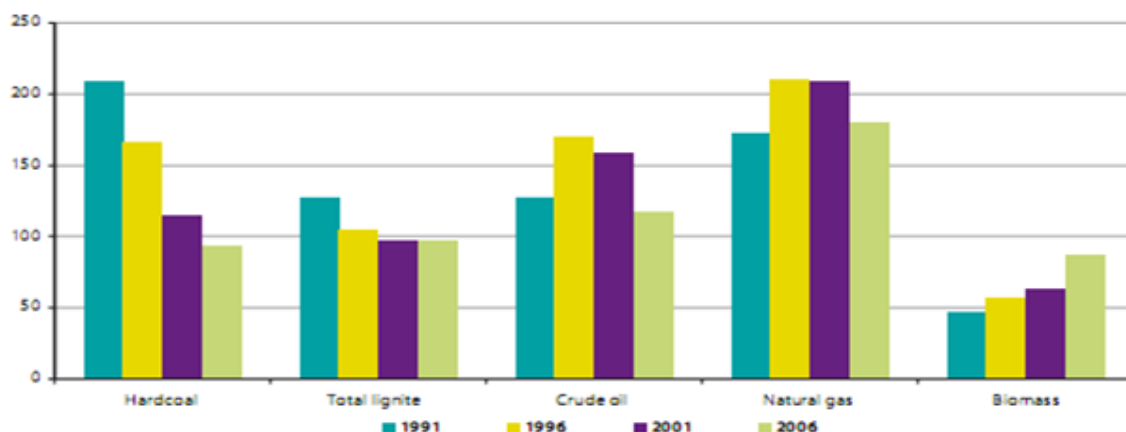


Figura 2.8: Produção primária de energia por combustível, UE-27 (Mtoe). Fonte: [22].

De um modo geral, a produção total de energia primária na UE-27 tem vindo a diminuir de um modo contínuo no período de 2000-2009 (-13%). Contudo, registou-se em 2010 um aumento de 2% relativamente a 2009, chegando a 831Mto (Tabela 9). Referente a este valor, 28% é proveniente de energia nuclear, seguindo-se as energias renováveis (20%), os combustíveis sólidos (20%), o gás (19%) e o petróleo (12%) [25].

Tabela 2.9: Produção primária de energia por combustível, UE-27 (Mtoe). Eurostat (online data code: nrg_100a, nrg_101a, nrg_102a, nrg_103a, nrg_104a, nrg_1071a); [25].

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Change (%)
Total	941	941	940	932	928	897	878	857	850	814	831	- 12
Oil	173	161	166	156	145	133	121	120	112	105	97	- 44
Gas	208	208	204	200	203	189	179	167	168	153	156	- 25
Nuclear	244	253	256	257	260	258	255	241	242	231	237	- 3
Hard coal	119	114	111	108	103	99	94	89	83	74	73	- 39
Lignite	94	97	99	99	98	96	97	96	94	91	90	- 4
RES	97	100	98	104	112	116	124	134	142	149	167	72

Entre 2000 e 2010, a produção de por extenso (RES) registou um aumento de 72%, contrariamente à produção dos restantes combustíveis que registaram uma diminuição. A maior redução foi registada na produção de petróleo (-44%), seguindo-se o gás (-25%), os combustíveis sólidos (-23%) e a energia nuclear (-3%) [25].

A relação entre a produção primária e o consumo tem mudado ao longo dos últimos anos, acompanhada por um aumento da dependência nas importações dos combustíveis fósseis. Fatores como o declínio de algumas das principais fontes de recursos de combustíveis fósseis na UE, a

liberalização do mercado e o comércio livre, fizeram com que as importações se tornassem menos dispendiosas nos últimos anos. Como consequência, todas as principais mercadorias (petróleo, gás natural, carvão) registaram um decréscimo significativo da produção primária no consumo interno bruto [25].

A densidade de energia da lenhite e da biomassa é mais baixa, comparativamente com a do carvão, logo são menos passíveis de comércio internacional. No caso particular da biomassa, alguns tipos de biomassa preparada como os *pellets* viram aumentar o seu comércio internacional. A redução da disponibilidade de carvão na UE tem levado a um aumento das importações, e por sua vez, a procura de gás natural tem superado cada vez mais a oferta no âmbito da UE, como resultado a quota de produção primário do carvão mineral e gás natural no consumo interno bruto tem vindo a diminuir de forma constante. A taxa de declínio do petróleo é similar com a do carvão e gás natural, o consumo do petróleo diminui noutros sectores para além do sector do transporte, especialmente no caso do aquecimento e da geração elétrica [22]. Contrariamente à produção primária, a mistura de combustíveis do consumo interno bruto da UE-27 não mudou significativamente ao longo da última década. Em 2010, o petróleo representava 35% do consumo interno bruto, seguindo-se o gás natural (25%), os combustíveis sólidos (16%), a energia nuclear (13%) e as energias renováveis (10%) (Figura 9 e Figura 10).

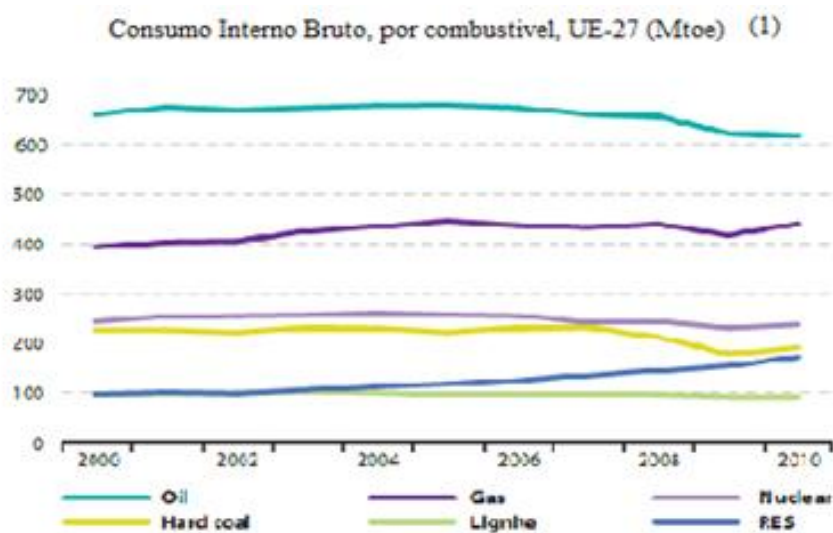


Figura 2.9: Produção Primária e Consumo Interno Bruto, por combustível, UE-27. Fonte: [25].

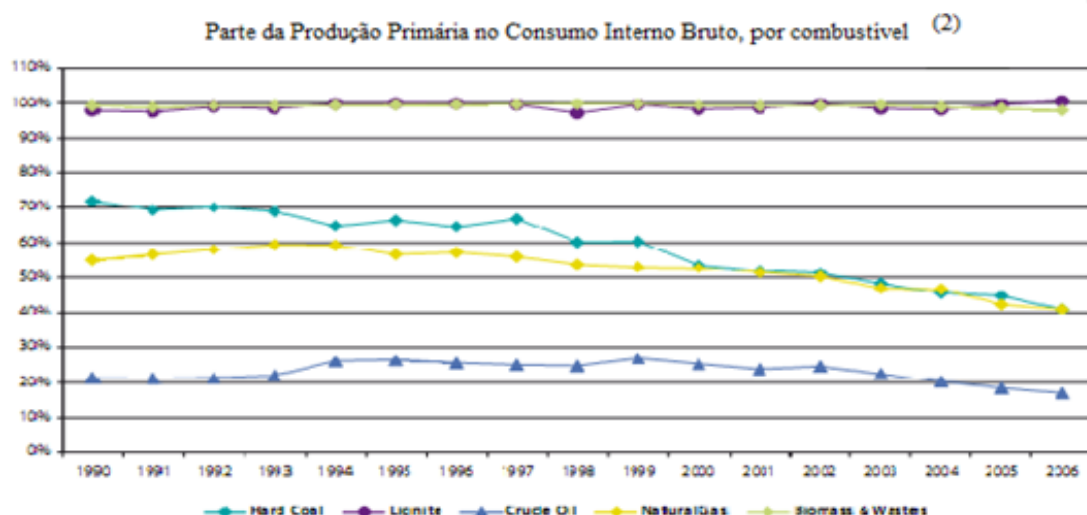


Figura 2.10: Produção Primária e Consumo Interno Bruto, por combustível, UE-27. Fonte: [22].

De 2000 a 2004, o consumo interno bruto na UE-27 registou uma tendência de crescimento, seguindo-se sinais de estabilização até 2006. Desde então, tem-se registado uma diminuição gradual sendo que entre 2008 e 2009 se registou a maior taxa de redução anual da última década (-5%). Particularmente em 2009 o consumo interno bruto na UE-27 atingiu 1,703Mtoe, os níveis mais baixos da década, tendo-se ainda assim registado um ligeiro crescimento entre 2009 e 2010 de 3%, atingindo em 2010 1,759Mtoe [25]. Entre 2000 e 2010, a queda de consumo mais elevada foi registada nos combustíveis sólidos (-13%), seguindo-se o petróleo (-7%), e a energia nuclear (-3%). Contudo, os consumos de gás e RES registaram um aumento de 12% e 78%, respetivamente (Tabela 10) [25].

Tabela 2.10: Consumo Interno Bruto, por combustível, UE-27 (Mtoe). Eurostat (online data code: nrg_100a; nrg_101a; nrg_102a; nrg_103a; nrg_104a; nrg_1071a); [25].

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Change (%)
Total	1 725	1 763	1 758	1 799	1 820	1 824	1 826	1 809	1 800	1 703	1 759	2
Oil	661	676	671	675	679	679	675	661	657	623	617	-7
Gas	394	404	405	425	435	446	438	433	441	417	442	12
Nuclear	244	253	256	257	260	258	255	241	242	231	237	-3
Hard coal	225	225	221	230	228	222	229	231	212	178	190	-16
Lignite	95	98	98	101	99	96	96	97	94	90	90	-5
RES	97	100	98	104	112	116	123	134	144	153	172	78

De 2000 a 2010, as importações líquidas de combustíveis sólidos na UE-27 registaram um aumento de 12%. Particularmente, de 2000 a 2008, as importações líquidas de combustíveis sólidos

registraram um aumento de 41%, tendo diminuído 18% de 2008 a 2009, e 2% 2009 e 2010 (Tabela 11) [25].

Tabela 2.11: Importações de combustíveis sólidos e petróleo, UE-27 (Mt). Eurostat (online data code: nrg_101a; nrg_102a); [25].

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Solid fuels	155	172	167	183	198	197	212	217	218	178	174
Oil	528	551	538	559	574	594	602	582	592	552	554

De 2000 a 2010, as importações de carvão na UE-27 registraram um aumento de 12% e as importações de petróleo bruto registraram uma queda de 3% durante a última década. No mesmo período registou-se um crescimento de 48% de gás natural, na UE-27, com a Rússia como principal fornecedor tendo tido uma participação de 32% do total das importações de gás natural em 2010 [25] (Figura 11).

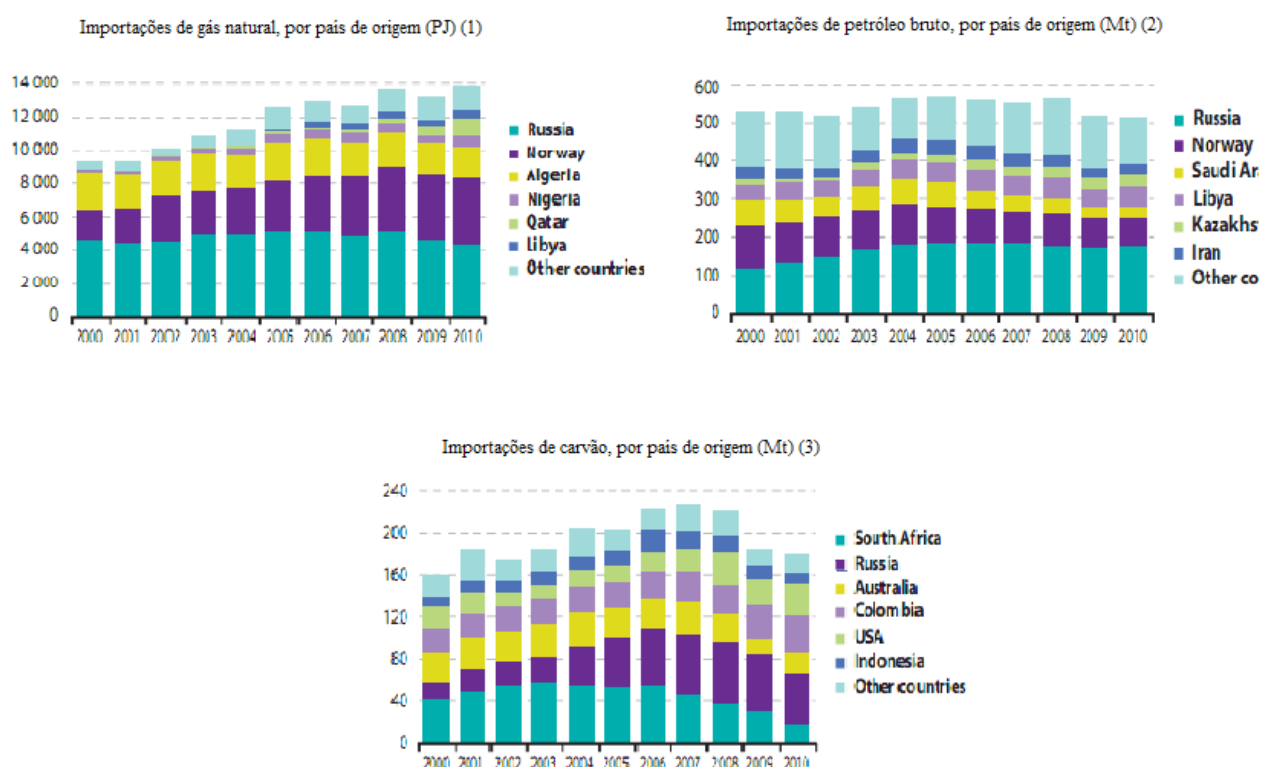


Figura 2.11: Importações de diferentes tipos de combustíveis, por país de origem. Adaptada a partir de Eurostat [25] (online data code: nrg_122a; nrg_123a; nrg_124a).

Em 2010, as importações da Rússia foram responsáveis por 35% das importações totais, comparativamente com a quota de 22% em 2000 e a participação da Rússia no total de importações na UE-27 foi de 27%, contra 9% em 2000 [25].

Os principais importadores de combustíveis sólidos foram a Alemanha (28% do total da UE em 210), o Reino Unido (15%) e a Itália (13%). Nesta última década, as importações líquidas do petróleo na UE-27 registaram um aumento de 5%. Em 2010, o único Estado Membro de exportação foi a Dinamarca, enquanto os principais Estados Membros importadores de petróleo foram a Alemanha (20%), a França (15%), a Espanha (12%) e a Itália (12%) (Figura 12) [25].

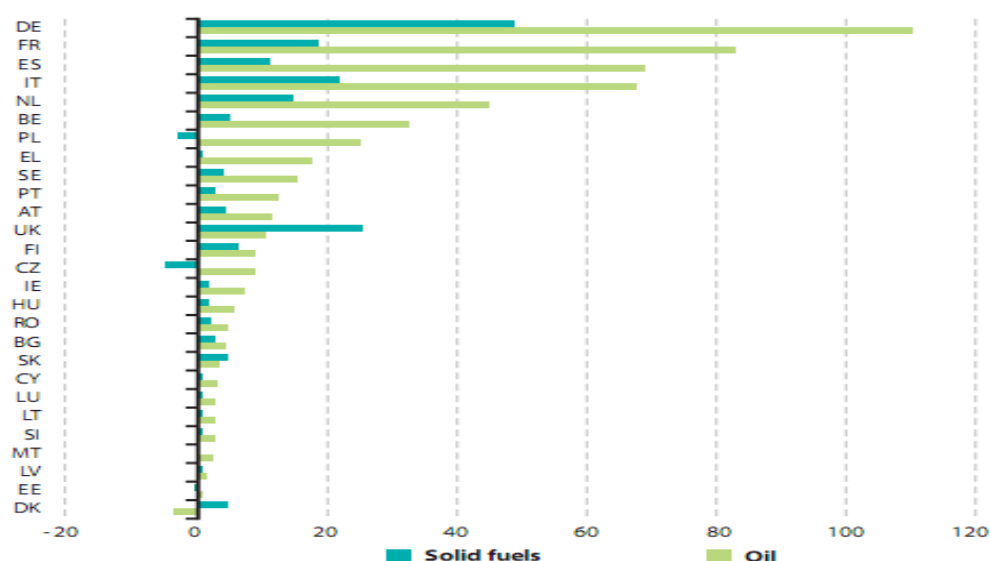


Figura 2.12: Importações de combustíveis sólidos e petróleo, em 2010 (Mt). Eurostat (online data code: nrg_101a; nrg_102a); [25].

Entre 2000 e 2010, as importações de gás natural na UE-27 registaram um aumento de 43%, sendo que as maiores taxas de crescimento anuais foram registadas entre 2001 e 2006. No período de 2006 a 2010, as importações líquidas de gás natural na UE-27 registaram uma estabilização (Tabela 12) [25].

Tabela 2.12: Importações de gás natural, UE-27 (PJ). Eurostat (online data code: nrg_103a); [25].

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
EU-27	8 957	8 872	9 635	10 376	10 928	11 969	12 401	12 141	12 777	12 463	12 818

Em 2010, os únicos Estados Membros que exportaram gás natural foram a Holanda e a Dinamarca. Ao longo desta década tem-se vindo a observar reduções significativas em importações de gás natural na Roménia (-33%) e Bulgária (-22%) (Figura 13) [25].

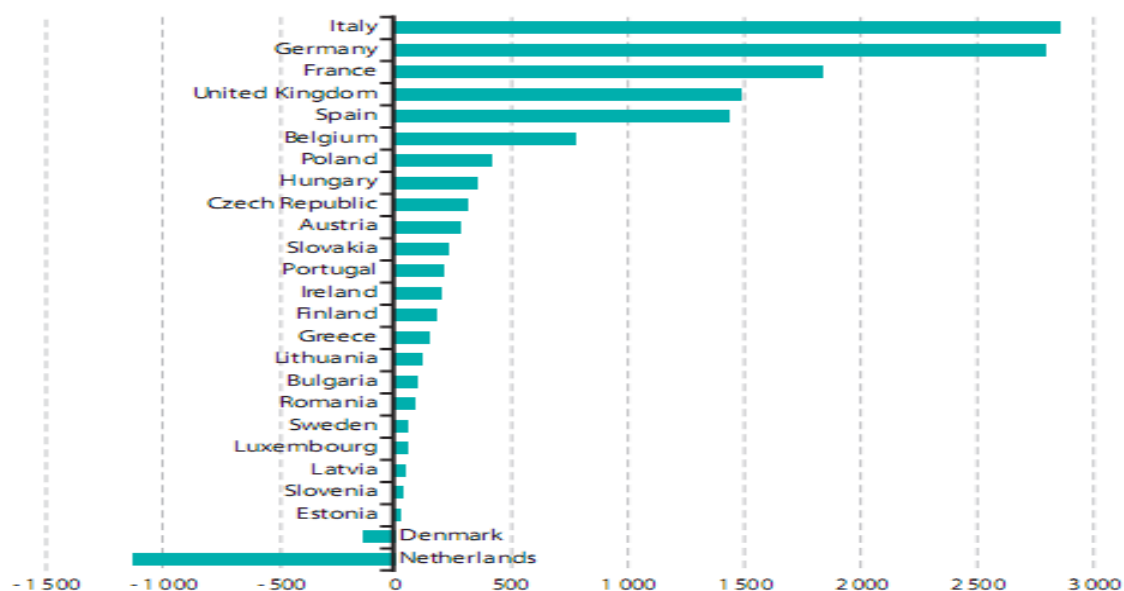


Figura 2.13: Importações de gás natural, 2010 (PJ). Eurostat (online data code: nrg_103a); [25].

Em 2010, as importações líquidas de energia elétrica na UE-27 atingiram o valor de 3,455GWh, embora tenham ocorrido algumas oscilações nas suas importações entre 2000 e 2004, tendo sido atingidos valores de 19,600GWh e -7,325GWh, respetivamente (Tabela 13) [25].

Tabela 2.13: Importações de eletricidade, UE-27 & Top5 Importadores e Exportadores. Eurostat (online data code: nrg_105a); [25].

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
EU-27	19.6	4.5	12.5	-3.2	-7.3	11.3	3.5	10.5	17.1	15.1	3.5
Top-5 exporters	-76.6	-77.7	-79.4	-90.1	-89.2	-86.5	-104.0	-99.7	-95.9	-65.0	-77.4
Top-5 importers	90.2	86.3	89.2	77.8	80.7	99.6	90.8	89.1	89.1	69.6	62.7

Entre os Estados Membros a Itália continua a ser o principal importador de eletricidade, em 2010 as suas importações atingiram o valor de 44,160GWh, quatro vezes mais que a Finlândia (10,501GWh) que é o segundo importador de topo. Por outro lado, nesta última década, a França foi o principal Estado Membro exportador, sendo que em 2010 as suas exportações atingiram o

valor de -30,749GWh, duas vezes mais que as exportações da Alemanha (-14,955GWh) (Figura 14) [25].

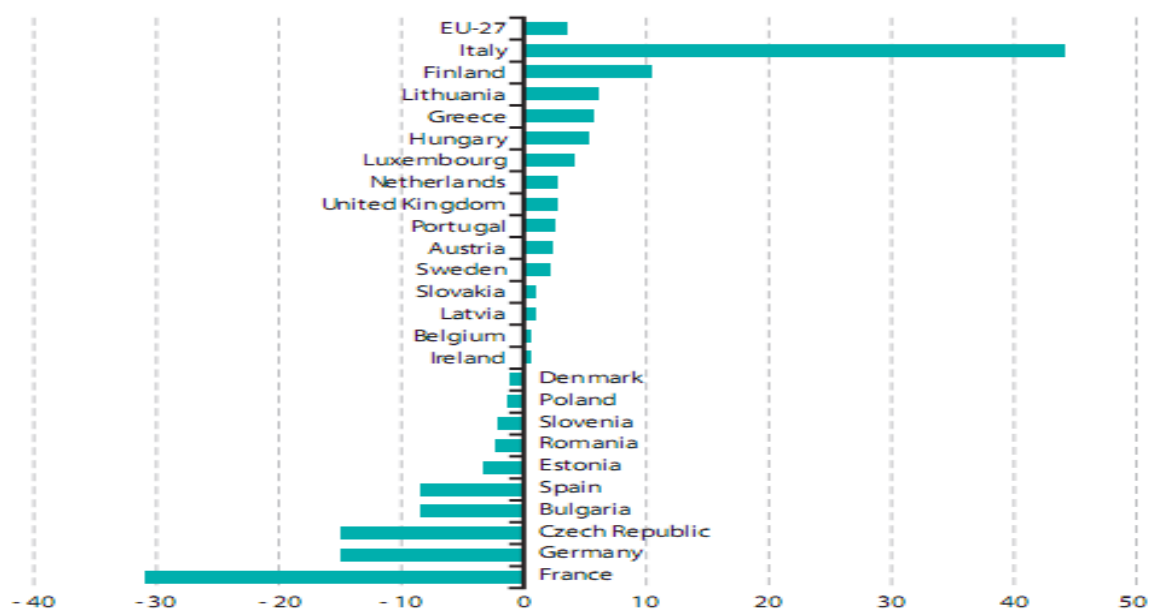


Figura 2.14: Importações de eletricidade, 2010 (TWh). Eurostat (online data code: nrg_105a); [25].

Nos últimos 15 anos a UE tem presenciado uma grande diversificação no que diz respeito à mistura de geração de eletricidade (Figura 15) [22].

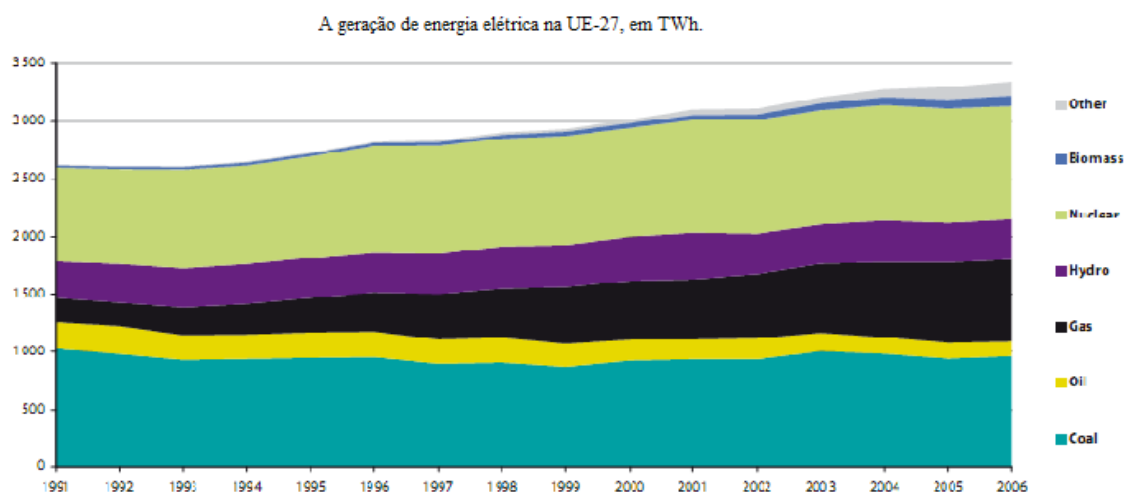


Figura 2.15: Geração de energia elétrica na UE-27, em TWh. Eurostat; [22].

Entre 1991 e 2006, a participação do gás natural na produção de energia aumentou de 8% para 21%, por sua vez a percentagem de carvão sofreu uma diminuição de 39% para 29%. No que diz respeito às energias renováveis, as que registaram um rápido aumento foram a energia eólica e a biomassa, enquanto a energia hidroelétrica aumentou ligeiramente, embora tenha baixado a sua participação de 12% em 1991 para 10% em 2006 [22].

Entre 2000 e 2010, o consumo final de energia na UE-27 registou ligeiros desvios. O maior consumo final de energia na UE-27 nesta última década, foi registado na Letónia (31%) e na Lituânia (26%). Em 2009, todos os setores registaram diminuições no consumo, mas em 2010 foi registado um aumento no consumo total. De 2000 a 2009, o maior crescimento observado foi registado no setor de serviços (32%), seguindo-se o setor dos transportes (7%), e o setor residencial (5%). No entanto, o consumo de energia no setor industrial registou uma diminuição de 12% (Tabela 14) [25].

Tabela 2.14: Consumo final de energia, por setor, UE-27 (Mtoe). Fonte: Eurostat (online data code: nrg_100a); [25].

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Change (%)
Total	1 121	1 145	1 132	1 171	1 186	1 191	1 192	1 165	1 174	1 112	1 153	3
Industry	330	329	325	338	336	331	324	323	313	268	292	- 12
Transport	341	345	348	353	363	367	374	380	378	367	365	7
Residential	292	302	293	298	302	303	300	285	297	294	307	5
Services	115	127	125	131	134	136	139	136	144	143	152	32
Other	42	43	41	51	51	54	54	42	43	40	37	- 13

Em 2010, o setor dos transportes consumiu cerca de 1/3 (32%) da energia final da UE-27, seguindo-se o setor residencial (27%), o setor industrial (25%) e por último o setor dos serviços (13%) (Figura 16) [25].

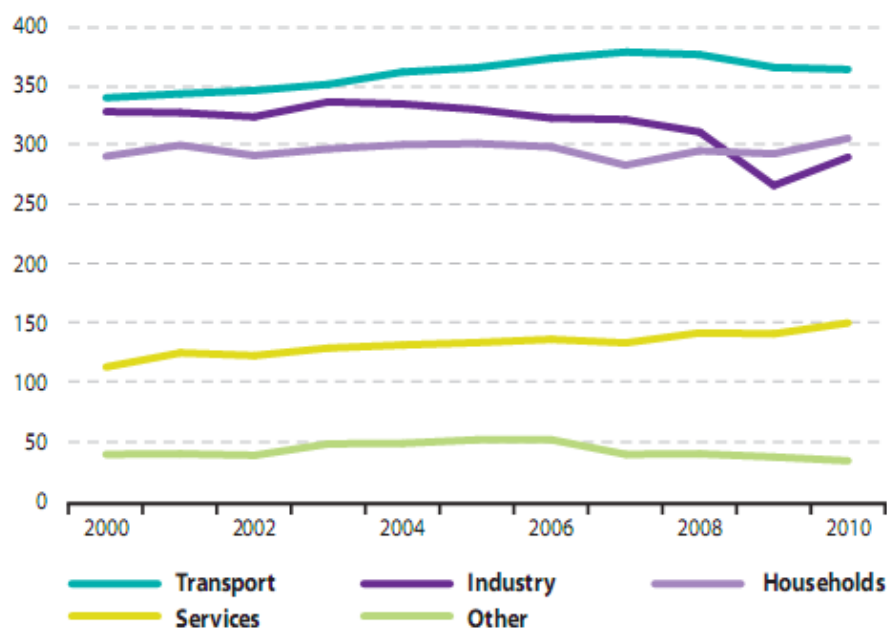


Figura 2.16: Consumo final de energia, por setor, UE-27 (Mtoe). Fonte: Eurostat (online data code: nrg_100a); [25].

Durante o período de 2000 a 2010, o consumo de derivados do petróleo na indústria registou uma queda de 32%, seguindo-se os combustíveis sólidos (-27%), os gases (-17%) e a energia elétrica (-2%). Por outro lado, o consumo de calor derivado registou um aumento de 56%, o consumo de energias renováveis registaram um aumento de 38% (Tabela 15) [25].

Tabela 2.15: Consumo final de energia na indústria, por combustível, UE-27 (Mtoe). Fonte: Eurostat (online data code: nrg_100a; nrg_101a; nrg_102a; nrg_103a; nrg_105a; nrg_106a; nrg_1071a); [25].

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Change (%)
Total	330	329	325	338	336	331	324	323	313	268	292	-12
Solid fuels and derivatives	49	46	43	44	44	43	42	43	41	31	35	-27
Oil products	51	53	51	52	50	48	46	44	41	36	35	-32
Gases	112	112	111	114	108	105	99	99	96	81	92	-17
Electricity	91	92	93	93	96	97	97	99	97	83	89	-2
Renewable energies	16	15	16	16	17	17	18	20	20	19	22	38
Derived heat	10	10	11	18	21	21	20	16	16	15	16	56

Entre 2008 e 2009, registou-se uma diminuição no consumo industrial de todos os gases, de 2009 a 2010 o consumo de todos os gases, com a exceção dos derivados do petróleo, registaram um aumento. Em 2010, os gases cobriram cerca de 32% das necessidades energéticas na UE-27, enquanto a indústria e a eletricidade cobriram 31%, a seguir temos os combustíveis sólidos e os

derivados do petróleo, ambos com cotas de 12%. As energias renováveis e o calor derivado apresentaram contribuições menores de 7% e 5%, respetivamente (Figura 17) [25].

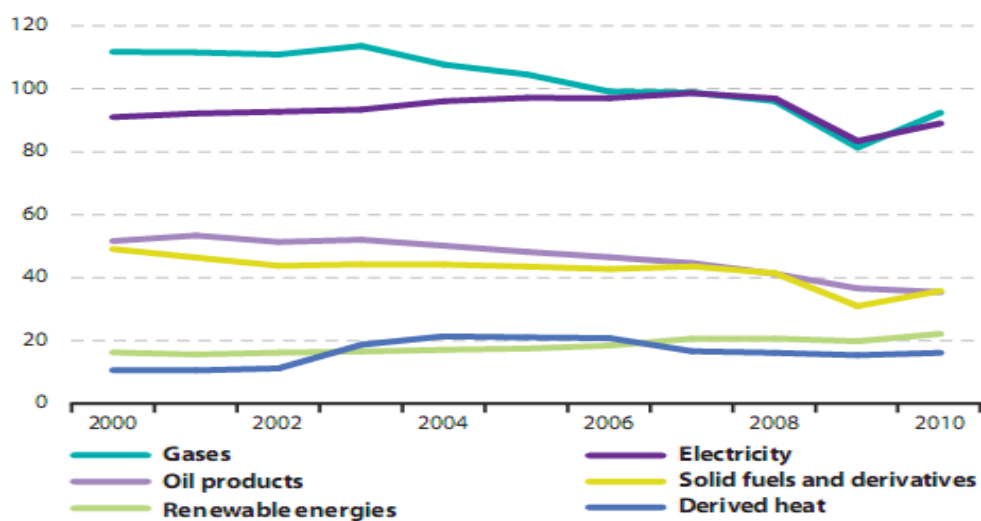


Figura 2.17: Consumo final de energia na indústria, por combustível, UE-27 (Mtoe). Fonte: Eurostat (online data code: nrg_100a; nrg_101a; nrg_102a; nrg_103a; nrg_105a; nrg_106a; nrg_1071a); [25].

Nos últimos dez anos, foram observadas na UE-27, alterações significativas na mistura de combustíveis consumidos pelo setor de transportes. Em 2010, o gás/gasóleo foram responsáveis por 53% do total de energia consumida, um aumento de 9 pontos percentuais em relação a 2000. Em 2010, os querosenes e os biocombustíveis foram responsáveis por 14% e 4%, respetivamente, do consumo total de energia no setor dos transportes (Figura 18) [25].

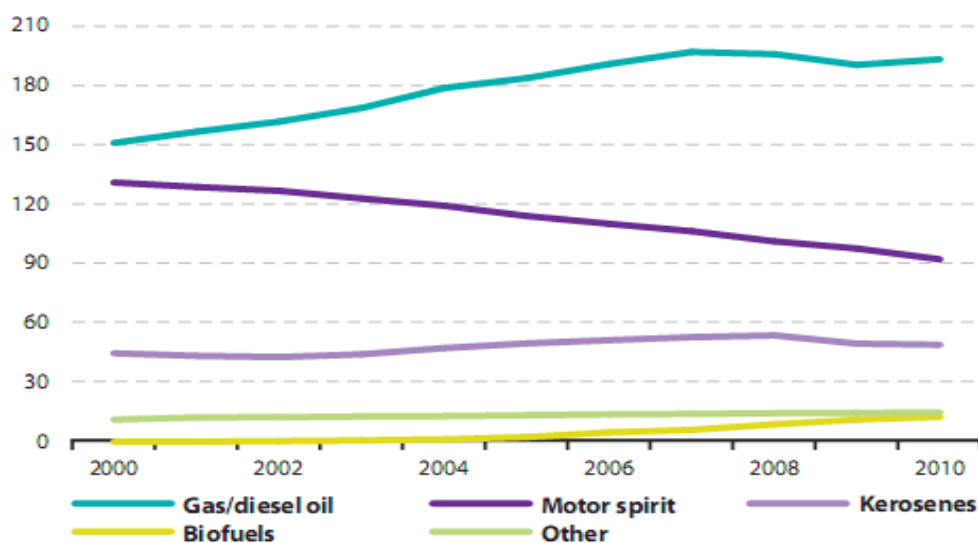


Figura 2.18: Consumo final de energia nos setor dos transportes, por combustível, UE-27 (Mtoe). Fonte: Eurostat (online data code: nrg_100a; nrg_102a; nrg_1073a); [25].

Entre 2000 e 2010, o consumo em termos absolutos de GPL registou uma queda de 29%, contudo foram registados crescimentos no consumo de gás/gasóleo (28%), no consumo de querosenes (9%) e no consumo dos biocombustíveis (Tabela 16). No que diz respeito aos biocombustíveis, em 2010 as percentagens mais elevadas de consumo foram registadas na Eslováquia (6%), na Áustria (6%) e na Polónia (5%) [25].

Tabela 2.16: Consumo final de energia no setor de transporte, por combustível, UE-27 (Mtoe). Fonte: Eurostat (online data code: nrg_100a; nrg_102a; nrg_1073a); [25].

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Change (%)
Total	341	345	348	353	363	367	374	380	378	367	365	7
Motor spirit	132	129	127	124	120	115	111	107	102	98	93	- 29
Gas/diesel oil	152	157	162	169	179	184	191	198	196	191	194	28
Kerosenes	45	44	43	45	48	50	52	54	54	50	50	9
Biofuels	1	1	1	1	2	3	5	7	10	12	13	1 784
Other	12	13	13	14	14	14	15	15	15	15	15	30

Uma das principais ligações energia-clima são as emissões dos gases com efeito de estufa. As metas de mitigação constituem agora o objetivo central da política energética da UE, tendo como objetivo uma economia de baixo carbono e por isso mesmo uma economia europeia mais competitiva [22].

Em 2006, as emissões de GEE relacionadas com a energia representaram 80% do total de emissões de GEE na Europa. Este valor quase que representa a parte das emissões de CO₂ de todos os GEE, que foi 83% em 2006. Existem várias atividade relacionadas com a energia que produzem emissões de GEE, nomeadamente as indústrias de energia (calor e energia, distribuição de energia, etc.), transporte, serviços de fabricação, habitações domésticas, agricultura e outras categorias. Existem ainda emissões, conhecidas com emissões fugitivas, que estão relacionadas com a não-combustão associada à exploração, processamento, transporte e produção de combustíveis (Figura 19) [22].

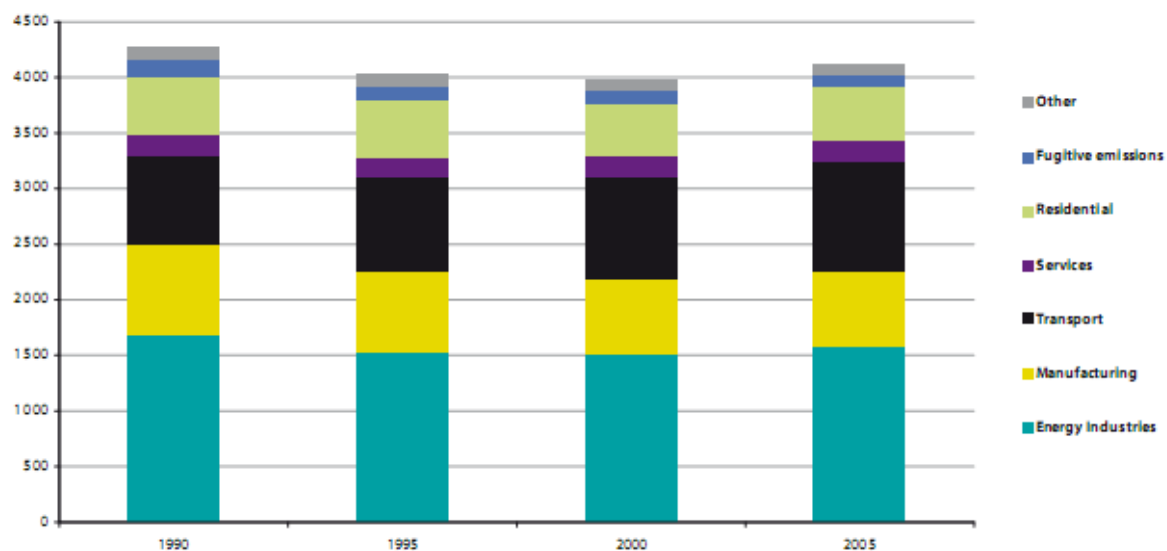


Figura 2.19: Emissões de gases de efeito de estufa por setor, em milhões de toneladas de CO₂ equivalente, na UE-27; Fonte: [22]; [26]; [27].

Ao longo do período de 1990 a 2005, o setor de transporte é o único que registou um aumento absoluto de 27%. Estas correspondem assim a quase 1/4 de todas as emissões relacionadas com a energia [22].

3 ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

As alterações no clima terrestre não são um acontecimento recente na Terra, durante vários milénios o planeta tem estado sujeito a uma sucessão de grandes idades de gelo intercaladas com períodos mais quentes, sendo que se encontra atualmente num período interglaciar [28]. Vários estudos demonstram, principalmente através da análise de núcleos de gelo provenientes de Estações na Antártida, que estes períodos interglaciares estiveram sujeito a elevadas temperaturas e concentrações de CO₂ atmosférico, como aquelas que se estão a sentir nas últimas décadas [29]. Estas variações naturais consideradas normais são enormes e as condições extremas de clima não são novidade. A grande diferença é que estes tipos de alterações ocorreram em escalas de tempo de longo prazo, e o rápido aumento de gases de efeito de estufa na atmosfera que se tem vindo a observar tem ocorrido numa escala de curto prazo, ao longo dos últimos 200 anos e mais substancialmente nos últimos 50 anos. Como tal, para se identificar se as alterações climáticas estão relacionadas com este aumento de GEE, é necessário procurar tendências no aquecimento global com similar escalas de tempo [30] [31] [32].

A definição de alterações climáticas é relativamente recente, tendo ganho destaque principalmente há pouco mais de três décadas. Contudo, a sensibilidade face aos vários impactes de atividades humanas sobre o ambiente teve início no século XIX. Arrhenius (1896) foi o primeiro a publicar um estudo sobre a avaliação do impacto à escala global das emissões de CO₂, provocadas pela combustão do carvão, chegando à conclusão de que uma duplicação do CO₂ atmosférico provocaria uma subida da temperatura média global de 5°C a 6°C. Passados 120 anos, o problema mantêm-se e é neste momento um dos principais debates da sociedade, com os níveis de poluição ambiental, intensidade e frequência temporal das alterações climáticas antropogénicas muito mais elevados [32]. Algumas das atividades humanas estarão a alterar os ciclos biogeoquímicos globais, a alterar profundamente o ciclo de carbono, azoto e fósforo e até mesmo a alterar a composição da atmosfera, sem se compreender com exatidão as profundas consequências que tudo isso irá causar [33] [34].

3.1 Institucionalização Internacional das Alterações Climáticas

A preocupação para se criar instituições internacionais com o objetivo de se aperfeiçoar o nosso conhecimento do sistema terrestre e do efeito que os impactos intensivos das alterações globais antropogénicas têm sobre o mesmo, e consequentemente desenvolver medidas de mitigação para se poder evitar profundas alterações nos ecossistemas e perdas elevadas de biodiversidade, têm já várias décadas.

Em 1979 a Conferência Mundial do Clima (ICSU) e a Organização Meteorológica Mundial criaram o Programa de Investigação Mundial do Clima (WCRP) que teve como objetivo um

melhor entendimento do sistema climático e a consequente interferência humana no mesmo. No período de 1987 a 1990, criou-se o Programa Internacional Geosfera-Biosfera (IGBP) com o apoio dos cientistas *Bert Botin, James McCarthy, Paul Crutzen e Hans Oeschger*, e cujo objetivo seria o estudo das interações entre o sistema terrestre e os sistemas humanos através dos vários processos biológicos, químicos e físicos. Em 1991 criou-se o programa denominado ‘DIVERSITAS’, com o propósito de se estudar a complexa perda e modificação de biodiversidade a nível global, e em 1996 criou-se um novo programa, com o mesmo propósito, designado ‘Programa Internacional sobre as Dimensões Humanas das Alterações Globais do Ambiente’ (IHDP).

Em 1997 tivemos um marco importante com a criação do Protocolo de Quioto por parte da UNFCCC, com o intuito de se reduzir as emissões de GEE em 5,2% dos países desenvolvidos, até ao ano de 2012. Mais tarde em 2001, realizou-se a primeira ‘*Global Change Open Science Conference*’ em Amsterdão, onde se aprovou a Declaração de Amsterdão e se reconheceu que há uma crescente preocupação com o aumento do impacto de algumas atividades humanas no ambiente e as respetivas implicações das mesmas na qualidade de vida e desenvolvimento humano [34].

Alguns dos relatórios científicos mais credibilizados têm sido os levado a cabo pelo IPCC, sendo que as metas a atingir no que diz respeito às emissões de GEE são tomadas com base nesses mesmos relatórios. Estes têm como principal objetivo prever a evolução do sistema climático como resposta ao aumento da intensidade do efeito de estufa que se tem vindo a registar nas últimas décadas. Existem três cenários evolutivos dos níveis de CO₂ na atmosfera, simulados pelos IPCC, que se destacam, tais como o POLES, o WEM e PRIMES [3].

O *Prospective Outlook for the Long Term Energy System* (POLES), surge em 2006 e representa a evolução da procura de energias adotando algumas medidas de redução de GEE até 2050, estando assim de acordo com os objetivos estabelecidos da UE que limita o aumento da temperatura de superfície global em 2°C até 2050. O *World Energy Model* (WEM) tem como principal objetivo a simulação do mercado energético, tendo em conta a procura final de energia, centrais de produção, refinarias e outras indústrias de transformação, a oferta de energia fóssil e emissões de CO₂. Por fim, o PRIMES analisa o mercado de energia europeu no período de 2000 a 2030, incluindo a adaptação de novas tecnologias para as centrais de produção elétrica atuais e a aplicação de novas tecnologias como as tecnologias de captura e armazenamento de CO₂, quer para centrais atuais quer para futuras centrais [3].

Em 2009, a ‘Conferência de Partidos’ (COP 15th), procedeu à elaboração do Acordo de Copenhaga, outro marco importante visto este comprometer-se a limitar o aumento da temperatura global em 2°C, de modo a se conseguir evitar perigosas interferências antropogénicas no sistema climático [35]. Por último, em 2012 teve lugar a conferência ‘*Planet Under Pressure: New*

Knowledge Towards Solutions' (PUP), que volta a dar ênfase aos riscos das alterações globais antropogénicas propondo uma via para um desenvolvimento sustentável [36] [33].

3.1.1 Protocolo de Quioto

O Protocolo de Quioto foi estabelecido pela *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), e entrou em vigor a 16 de Fevereiro de 2006. Uma das grandes características do Protocolo de Quioto foi o facto de ter estabelecido metas obrigatórias para 37 países industrializados, juntamente com a União Europeia, com o objetivo de redução de emissões de GEE. Foi traçada uma meta de redução de 5% relativamente aos níveis de 1990, para o período de 2008 a 2012 [36].

A UE é um dos principais contribuintes do Protocolo de Quioto, com as metas de redução de emissões de GEE no período de 2008-2012 de 8% [26] [37]. Ao longo do período de 20 anos, as emissões da UE-15 diminuíram 10,6% (452 milhões de toneladas de CO₂ equivalente), enquanto as emissões da UE-27 diminuíram 15,4% (862 milhões de toneladas de CO₂ equivalente), embora as emissões tenham aumentado em 2,1% (78,5 milhões de toneladas de CO₂ equivalente) e 2,4% (111 milhões de toneladas de CO₂ equivalente) entre 2009-2010, respetivamente. De acordo com as projeções feitas pelos Estados-Membros, a UE não será capaz de alcançar as metas de redução de emissões de GEE em 20% até 2020 [26] [36] [38]. A Rússia e o Japão são também países que contribuem bastante para o objetivo do Protocolo de Quioto, onde a Rússia apresenta um compromisso de manter as suas emissões ao nível de 1990 e o Japão um compromisso de redução de GEE em 6% com base nos níveis de 1990 [37].

Dentro do Protocolo de Quioto, o mecanismo mais importante é o *Clean Development Mechanism* (CDM). Este mecanismo representa a possibilidade dos países industrializados do Anexo B do protocolo implementarem em países em vias de desenvolvimento projetos de redução de emissões, tendo assim a possibilidade de ganhar uma redução de emissões certificada (CER), créditos que podem ser contados para o cumprimento das metas estabelecidas pelo protocolo. No geral, espera-se que o CDM diminua os custos dos cumprimentos das metas estabelecidas pelo protocolo e que ajude os países em desenvolvimento a atingir um desenvolvimento sustentável, através da mobilização de investimento privado e transferência de tecnologias. Em 2009, o CDM validou e registou 1792 projetos submetidos e 2605 estavam no processo de validação. A estimativa é de que estes projetos gerem CER's no valor de 2,9 bilhões de toneladas de CO₂ até 2012, e cerca de 1,1 bilhões de CER's até 2020 [39] [34] [36].

Uma das grandes lacunas do Protocolo de Quioto é a não cooperação de países como os EUA, China e Índia. Uma vez que os EUA são os maiores emissores de GEE entre os países desenvolvidos, a sua não cooperação neste tratado internacional faz com que os esforços por parte de outros países surtam pouco efeito. Por si só, os EUA são obrigados a uma redução de GEE de

7%. Em relação aos países em vias de desenvolvimento, em 2006 a China ultrapassou os EUA como maior emissor de CO₂, e em 2007 a Índia substituiu a Rússia ficando em 3º lugar a nível mundial [40] [41] [36].

Sendo economias emergentes a sua demanda por energia cresceu bastante nos últimos 10 anos, a China é responsável por 36% do crescimento previsto para a utilização da energia global e a sua demanda será de 75% até 2035, a Índia será o 2º maior contribuidor para o aumento da demanda mundial, em 18%, até 2035. Porém, em 2035, os EUA serão ainda o 2º maior consumidor de energia do mundo, a seguir à China, ficando a Índia no 3º lugar [20] [40]. É imperativo que países com tal crescimento de demanda de energia façam parte destas institucionalizações internacionais que visam uma mitigação de GEE a uma escala mundial. Posto isto, e visto de uma perspetiva de mitigação para as alterações globais, o Protocolo de Quioto não consegue responder à necessidade de redução das emissões globais de GEE, apesar de ser considerado como um passo inicial crucial para o problema.

3.1.2 Acordo de Copenhaga

O Acordo de Copenhaga teve lugar em Dezembro de 2009, na cimeira das Nações Unidas para as alterações climáticas, e foi considerado como o acordo climático pós-Quioto onde a UE e os oito maiores países industriais (G8) deram a conhecer a sua ambição de limitar o aumento da temperatura global a um máximo de 2°C, e metas de redução das emissões globais de pelo menos 50% até 2050, com concentrações de CO₂ limitadas a valores entre 400ppm-450ppm [42] [20] [23] [35]. Contudo, de modo a se alcançar o decréscimo nos níveis de emissões estabelecido, os países desenvolvidos têm de reduzir as suas emissões entre 25% a 40% até 2020, tendo como base de comparação os níveis de 1990 [42]. Para além destes objetivos, foi disponibilizado também um fundo de recursos financeiros destinado a mitigar as alterações climáticas nos países em desenvolvimento no valor de 100 bilhões de dólares até 2020 [20] [43] [44].

Um ponto de extrema relevância na redação do Acordo de Copenhaga é a cooperação de países como a China, Índia, Brasil, África do Sul e EUA, que estiveram ausentes no Protocolo de Quioto. A participação de países com estas economias emergentes torna possível uma aplicação de medidas de mitigação para as alterações climáticas muito mais eficaz e com resultados muito mais significativos a longo prazo [36] [35]. Contudo, a solução não é encarar o problema com precaução, como tem sido até agora o caso, principalmente devido a questões políticas e económicas, mas sim com medidas ativas até 2020, e ações muito mais fortes para os anos a seguir. Esta é uma das razões que fazem com que os compromissos anunciados pelos países no âmbito do Acordo de Copenhaga fiquem aquém da meta estabelecida para a diminuição da temperatura global em 2°C [20] [36] [43] [44].

3.2 Aquecimento Global

As alterações climáticas são alterações que ocorrem no clima terrestre em longas escalas de tempo, e que são influenciadas por vários fatores, tendo como umas das suas consequências o aquecimento global. Por sua vez, o aquecimento global ocorre com o aumento da temperatura média de superfície da Terra, o que tem sido apoiado por um levantamento exaustivo de diferentes estudos que suportam diferentes tipos de evidências para as alterações globais [45] [46] [47].

Os principais impactes das alterações climáticas manifestam-se através do aumento gradual da temperatura global de superfície (aquecimento global), e os seus efeitos diferem consoante os ecossistema, em grande parte devido ao facto de as alterações nas temperaturas não serem uniformemente distribuídas. O aumento da temperatura global de superfície em 2°-3°C irá sentir-se mais acentuadamente nos polos, irá afetar as correntes oceânicas, os padrões de precipitação e padrões climáticos [48].

Consequente a esse aumento o degelo das calotes polares e dos glaciares irá aumentar, dando origem a um aumento do nível dos oceanos que afetará grande parte da população humana que vive nas zonas costeiras [49], eventos climáticos extremos serão cada vez mais frequentes e intensos (cheias, desastres climáticos, etc.), uma diminuição de biodiversidade nos ecossistemas pode já ser observada através da degradação e destruição dos habitats, perda de vegetação, fauna e flora selvagem terrestre e marinha, alteração do uso dos solos, proliferação de espécies invasoras, poluição e sobre-exploração de recursos [46].

O aquecimento global apresenta um complexo impacto na ecologia marinha, uma vez que os oceanos são grandes sumidouros de CO₂, mas à medida que as temperaturas aumentam a sua capacidade de armazenamento de CO₂ diminui, por outro lado níveis mais elevados de CO₂ provocam a acidificação dos oceanos, com graves consequências para a vida marinha [50] [49] [51].

O impacto das alterações climáticas na saúde humana e no sector agrícola é preocupante, à medida que experienciamos temperaturas globais de superfície cada vez mais elevadas, a tendência é um aumento de doenças infecciosas tropicais em países de 1º mundo, como por exemplo malária, dengue e leptospirose, um aumento da concentração do ozono troposférico e uma diminuição cada vez maior de produtividade das culturas agrícolas [46] [47] [51]. O sector agrícola será um dos sectores mais vulneráveis ao aquecimento global, temperaturas mais elevadas vão afetar a saúde das plantas e aumentar as ocorrências de pragas, a alteração nos padrões de precipitação vão reduzir a disponibilidade de água para a irrigação agrícola, o aumento do nível do mar e frequentes cheias vão perturbar os padrões globais de produtividade agrícola [46].

Os recursos hídricos vão ser muito afetados pelos impactes das alterações climáticas, nomeadamente o aquecimento global, com uma cada vez menor abundância de precipitação as secas e a desertificação intensificar-se-ão, o escoamento dos rios e a disponibilidade de água irá aumentar de 10% a 40% nas latitudes elevadas e em algumas regiões tropicais húmidas e diminuir de 10% a 30% nas regiões secas das latitudes médias e nas regiões tropicais secas [33]. Estima-se que em 2020, cerca de 75 milhões a 250 milhões de pessoas em África estarão expostas à escassez de recursos hídricos [3].

A nível socioeconómico os países em desenvolvimento estão muito mais susceptíveis às alterações climáticas, pois apresentam menos capacidades de adaptação por escassez de materiais, água e alimentos [46].

Atualmente existe bastante discordância sobre se a causa das alterações climáticas globais e o consequente aquecimento global, são ou não inteiramente da responsabilidade do ser Humano. Questões como a participação antropogénica no aquecimento global, a incerteza da possibilidade de mitigação desse fenómeno climático, a durabilidade e a severidade dos efeitos do aquecimento global na sociedade e meio ambiente, são tidas em conta por vários cientistas resultando numa disparidade de opiniões entre os mesmos.

A comunidade científica encontra-se assim dividida e existem vários estudos que defendem tanto a vertente das causas naturais como a vertente das causas antropogénicas [46] [52] [53] [54] [55] [56] [57] [45]. Independentemente da sua causa é um facto que se tem registado um aumento das temperaturas médias globais, durante as últimas décadas [31] [48].

CAUSAS NATURAIS

O ciclo solar é a variação de intensidade do vento solar e do campo magnético solar, mudanças nessas variações, em parte devido ao aumento da atividade solar, resultam em ciclos de aumento de atividade geomagnética da Terra e de oscilações de temperatura do plasma ionosférico na estratosfera do nosso planeta, aquecendo-o. A variação orbital consiste no aumento ou diminuição das variações solares devido às variações no movimento da Terra em relação ao sol, os fatores para essa variação são a precessão de equinócios, a excentricidade orbital e a inclinação do eixo terrestre. O movimento das placas tectónicas, conhecido como a deriva dos continentes, pode provocar distúrbios na atmosfera. Os fenómenos El Niño e La Niña são mudanças na temperatura da água de partes do Oceano Pacífico, as variações que estes fenómenos criam nos ventos Alísios influenciam a pressão atmosférica do oceano, afetando vários fenómenos climáticos em todo o mundo. A atividade vulcânica natural do nosso planeta também é um fator que influencia a temperatura global de superfície, uma vez que a atmosfera carregada de pó vulcânico retém a radiação terrestre, aumentando a temperatura de superfície da Terra [14].

Na literatura corrente existem vários autores que defendem que o aquecimento que se tem vindo a sentir ao longo destas últimas décadas, acontece principalmente devido a causas naturais. A maior parte dos apoiantes das causas naturais acusam os climatologistas de alarmismo, tanto no excesso de interpretação como de exagero na evidência dos impactes humanos no sistema climático [57] [56]. Alguns céticos extremistas chegam ao ponto de declarar o aquecimento como uma ‘fraude’ e ‘erro’ [55] [56] [58].

De acordo com Toggweiler & Lea (2010) e Shakun *et al.* (2012) o CO₂ não é o iniciador das grandes alterações do clima glacial-interglacial, presumivelmente estas são controladas pelos ciclos orbitais Milankovitch. Todavia, sugerem que o aumento subsequente do CO₂ pode amplificar ou em alguns períodos preceder o aumento da temperatura global iniciada pelos ciclos Milankovitch, ainda que a interpretação dos dados seja ambígua em relação a isso [59] [60].

Singer defende que sempre existiu uma grande variação de temperaturas séculos antes de as concentrações de CO₂ sofrerem alterações, logo, não existe nenhuma base empírica que afirme que as mudanças nas concentrações de CO₂ atmosférico são a principal causa para as alterações climáticas passadas e presentes. Afirma ainda que fatores como o degelo dos glaciares e o desaparecimento dos lençóis de gelo do Ártico são irrelevantes como esclarecimento para as causas do aquecimento global, qualquer aquecimento significativo natural ou antropogénico irá ter impactes nas zonas mais frias do planeta, acrescenta ainda que usar este tipo de acontecimentos como prova de um aquecimento global é simplesmente confundir as consequências de um acontecimento com as suas causas [52].

CAUSAS ANTROPOGÉNICAS

A principal causa antropogénica para o aquecimento global é a queima de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural, para a produção de energia, que através da sua combustão libertam para a atmosfera os gases responsáveis pelo aumento do efeito de estufa, resultando num aumento da temperatura global de superfície. A desflorestação é outro fator importante, o desaparecimento de grandes massas de florestas por todo o mundo resulta numa diminuição do sequestro de CO₂ atmosférico, atualmente considerado como o principal gás de efeito de estufa devido às suas elevadas concentrações na atmosfera. Este desaparecimento florestal é em grande parte devido a atividades humanas, tais como: desbaste comercial, agricultura intensiva, conversão dos solos florestais em zonas de pastagem para animais, exploração de minas, pedreiras e petróleo, construção de barragens, incêndios, etc. A poluição atmosférica é outro fator antropogénico, esta consiste na contaminação da atmosfera através de gases, partículas sólidas e/ou líquidas em suspensão, e afeta diretamente a saúde humana e os diversos ecossistemas [3] [61]

Apesar de muitos cientistas apresentarem ceticismo em relação às causas antropogénicas como principais origens do aquecimento global, existe uma quantidade, qualidade e diversidade cada vez

maior relativamente a informação científica que suporta as causas antropogénicas como principais impulsionadoras do aquecimento global [31] [30] [62] [29] [32] [47] [63] [64] [65] [66] [67] [68] [69] [70] [71] [72] [73] [59] [33]. Atualmente, cerca de 97% a 98% dos cientistas defendem a existência de uma alteração climática antropogénica, como a que é apresentada no IPCC AR4 (2007) [74].

Todo este consenso científico reside essencialmente no facto de o efeito de estufa ter por base leis fundamentais da física. As moléculas de CO₂ apresentam uma enorme capacidade de absorver e emitir radiação infravermelha, deste modo, quando se aumenta a concentração a CO₂ na troposfera a radiação infravermelha passa a ser emitida a uma maior altitude. Mas uma vez que a temperatura diminui com a altitude, o CO₂ passa a emitir em regiões onde a temperatura é mais baixa. Cria-se assim um desequilíbrio entre o fluxo radiativo solar absorvido pela Terra e o fluxo radiativo emitido pela mesma no infravermelho. Há mais energia a ser absorvida do que a ser emitida, contrariando assim o princípio de conservação de energia. O equilíbrio é atingido através do aumento da temperatura na troposfera, o que por sua vez aumenta o fluxo radiativo no infravermelho. Deste modo, um grande aumento das concentrações de GEE na troposfera vai influenciar a temperatura média global [33].

Já não é só a comunidade científica que reconhece que as atividades humanas podem estar a afetar o sistema climático do nosso planeta, uma crescente consciencialização tem surgido nas pessoas que se preocupam cada vez mais com o ambiente, com a poluição, com uma sustentabilidade energética, que se preocupam cada vez mais com o futuro da Terra. Este tipo de consciencialização origina pressões nas grandes empresas petrolíferas e empresas produtoras de energia. Uma cada vez maior preocupação do público em geral face às alterações climáticas e ao consequente aquecimento global proveniente da crescente libertação de GEE, faz com que as empresas tomem medidas de mitigação de GEE, criem metas de descarbonização e parcerias com os governos para atingirem metas de redução de emissões de CO₂.

3.3 Gases de Efeito de Estufa

3.3.1 Diferenciação entre Clima e Tempo

Antes de mais, é importante diferenciar dois conceitos distintos mas interligados, ‘clima’ e ‘tempo’. Ambos têm uma profunda influência na vida da Terra.

O ‘tempo’ caracteriza-se como o estado de flutuação da atmosfera, que inclui a temperatura, vento, precipitação, nuvens entre outros elementos. É visto como o resultado de um rápido desenvolvimento e decaimento de sistemas meteorológicos, com uma previsão limitada [3].

O ‘clima’ varia de região para região, depende da latitude, distância do mar, vegetação, presença ou ausência de montanhas e outros fatores geológicos. Varia no tempo, isto é, de estação para estação,

de ano para ano, década para década ou até mesmo em escalas de tempo de milhares de anos. É definido como tempo médio e a sua variabilidade ao longo do tempo, sendo que são essas variações ao longo do tempo que vão definir o conceito de alterações climáticas. No fundo o ‘clima’ é determinado pela circulação atmosférica e por todas as suas interações que existem entre as correntes oceânicas e o solo [3].

Se se quiser entender e, até de certa forma, prever com mais precisão as alterações climáticas antropogénicas, e também para melhor compreender o clima terrestre e as suas variações, não se pode ignorar nenhum dos componentes que determinam e caracterizam o ‘clima’. Há que saber em que consiste o balanço radiativo terrestre, e como funciona o nosso complexo sistema climático, incluindo a dinâmica e composição da atmosfera, dos oceanos, do gelo e neve, a superfície terrestre e as suas características (Figura 20) [3].

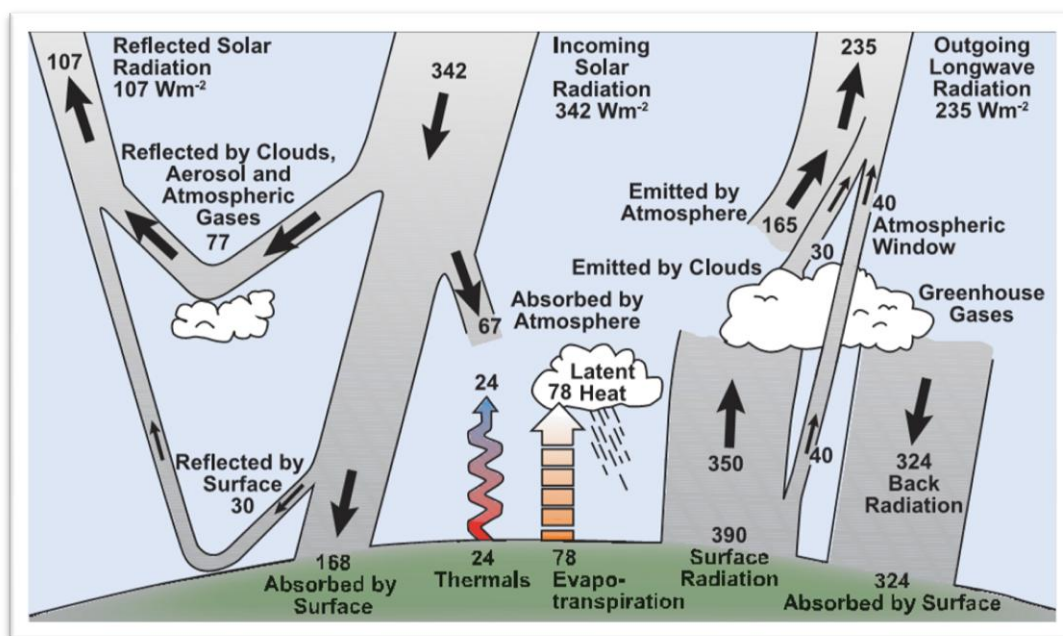


Figura 3.1: Estimativa do balanço médio energético terrestre global e anual. Fonte: [3].

3.3.2 Efeito de Estufa

A atmosfera é considerada como a parte mais instável do sistema climático, e encontra-se em rápida e constante mudança. É composta principalmente por azoto (78,1%), oxigénio (20,9%) e árgon (0,93%), sendo que estes gases têm uma interação limitada com a radiação solar incidente e não interagem com a radiação infravermelha emitida pela Terra. Para além destes gases existem ainda o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), são conhecidos como gases com efeito de estufa e desempenham um papel essencial no balanço de energia da Terra [75] [3].

O efeito de estufa é responsável pela modulação da quantidade de radiação terrestre que é perdida para o espaço, consequentemente permite que a temperatura da superfície da Terra se mantenha nos 15°C, em vez de -18°C, que seria a sua temperatura caso não existisse o efeito de estufa. O efeito de estufa consiste no aquecimento da superfície do planeta devido à presença de uma atmosfera constituída por gases que absorvem e emitem a radiação infravermelha [46] [1] [76].

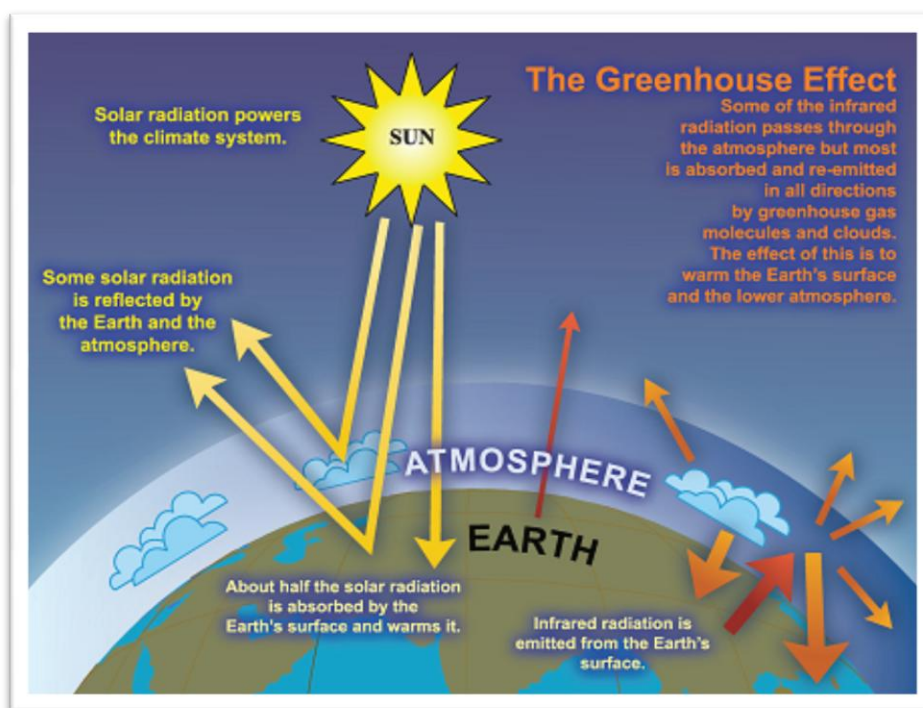


Figura 3.2: Modelo idealizado do efeito de estufa natural. Fonte: [3].

Cerca de 50% da energia solar que chega à superfície da Terra é refletida de novo para o espaço ou é absorvida na parte superior da atmosfera [1]. Os outros 50% vão ser absorvidos pelos solos ou massas de água da Terra, como resultado desse aquecimento estes emitem a seguir uma forma menos intensa de energia com comprimentos de onda longos. O CO₂ vai absorver a energia de comprimento de onda longo ou refleti-la de novo para a superfície, este aprisiona assim a energia irradiada convertendo-a em calor [46].

Apesar de toda esta preocupação com o efeito de estufa, é importante frisar que sem ele a temperatura média terrestre seria abaixo do ponto de congelamento da água, é também importante frisar que o efeito de estufa natural da Terra tornou possível o desenvolvimento da vida tal como se conhece atualmente (Figura 21) [3].

3.3.3 Ciclo Global do CO₂

O carbono é um elemento essencial para todas as formas de vida na Terra, e a sua reciclagem natural da atmosfera é um processo permanente, sendo que grande parte deste carbono se move sob a forma de dióxido de carbono (CO₂). O Ciclo do carbono tem recebido especial atenção porque 60% do aquecimento global observado é atribuído ao aumento da concentração do CO₂, de cerca de 280ppm no período pré-industrial para cerca de 387ppm nos dias de hoje [77].

O ciclo do carbono é um dos ciclos mais importantes da Terra, este permite que o carbono, o elemento mais abundante da Terra, seja reciclado e reutilizado pela biosfera. No ciclo natural do carbono, o carbono é trocado naturalmente entre a vegetação terrestre e a atmosfera através da fotossíntese e da respiração [46] [78].

Existem quatro principais reservatórios de carbono, o geológico, o oceânico, o terrestre e o atmosférico. Este encontram-se todos interligados e permitem que exista trocas de carbono entre si, tornando assim possível o ciclo natural do carbono (Figura 22) [1] [46]. As trocas de carbono entre os reservatórios são feitas por processos químicos, físicos, geológicos e biológicos. A percepção da enorme escala de armazenamento do carbono mostra que é viável a remoção do CO₂ da atmosfera para outros reservatórios em quantidades que nos permitirão controlar as emissões antropogénicas de CO₂ [46].

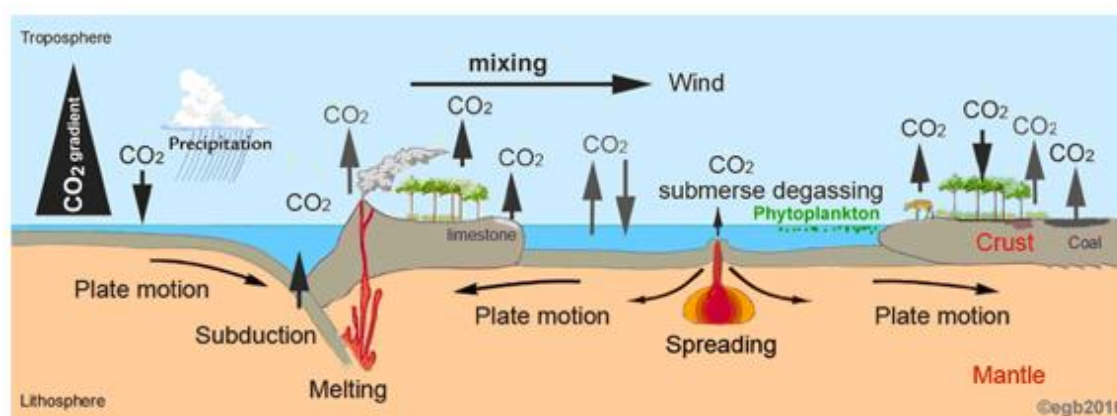


Figura 3.3: Fontes e sumidouros de CO₂ na camada limite da litosfera-troposfera. Adaptado de <http://www.biomind.de/realCO2/>.

Em contraste com o ciclo de carbono natural, com base na fotossíntese e na lenta conversão anaeróbia, o ciclo químico do carbono pode ocorrer a uma escala industrial de modo a proporcionar uma fonte de carbono sustentável, segura e renovável para a futura produção de hidrocarbonetos, derivados de combustíveis e produtos sintéticos dos quais a nossa sociedade depende [78].

3.3.4 Aumento do CO₂ antropogénico na Atmosfera

Existe uma enorme quantidade de estudos recentes que corroboram a ideia de que o atual aumento excessivamente rápido do CO₂ na atmosfera nas últimas décadas, se deve quase exclusivamente a emissões antropogénicas. Assim, uma das principais razões que levam o ser humano a estudar o tempo de vida do CO₂ atmosférico e o seu aumento na atmosfera tem a ver com o importante facto de se querer prever com mais exatidão o impacto da atividade humana sobre certos processos do complexo sistema climático do planeta, assim como o degelo das calotes polares [30], permafrost [79] e os impactos geoquímicos quando se altera a temperatura dos oceanos profundos [50].

Existiram sempre enormes variações nas concentrações de CO₂ atmosférico ao longo das eras geológicas da Terra. É possível adquirir um registo dessas alterações através da análise de isótopos de Boro em alguns sedimentos marinhos, nomeadamente calcários, dado que estes aumentam com o aumento da acidificação dos oceanos que por sua vez aumenta com o aumento da concentração de CO₂ atmosférico [30] [50]. Outro modo de estudo das flutuações de CO₂ atmosférico é a análise de bolhas de gás aprisionadas nas camadas de neve nas calotes polares da Antártida, estes registos mostram que os valores de CO₂ variaram entre 170ppm e 290ppm, nos últimos 800,000 anos [80]. Vastas atividades vulcânicas, também através de isótopos de Boro, indicam que a concentração de CO₂ na atmosfera da Terra nos últimos 20 milhões de anos não aumentou mais do que 400ppm [81].

Os valores de concentração de CO₂ não poderão ultrapassar os 400ppm para um aumento de temperatura global de 2°C, atualmente as concentrações de CO₂ estão perto de 390ppm [42]. Segundo investigadores do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) do Observatório Mauna Loa no Havai (Figura 23), a concentração de CO₂ na atmosfera atingiu valores recordes de aproximadamente 390ppm em 2011, sendo que o seu aumento continua a uma taxa de cerca de 1,9ppm por ano (Figura 23). Estes valores são superiores em cerca de 40% desde a Revolução Industrial (280ppm) e os mais altos dos últimos 650,000 anos. Este rápido aumento das concentrações do CO₂ atmosférico tem sido atribuído a uma crescente atividade industrial humana durante o último século, nomeadamente através da queima de combustíveis fósseis para a produção de energia. Como resposta a este aumento, a temperatura global de superfície terrestre tem aumentado 0,2°C por década nos últimos 30 anos [75] [68] [82].

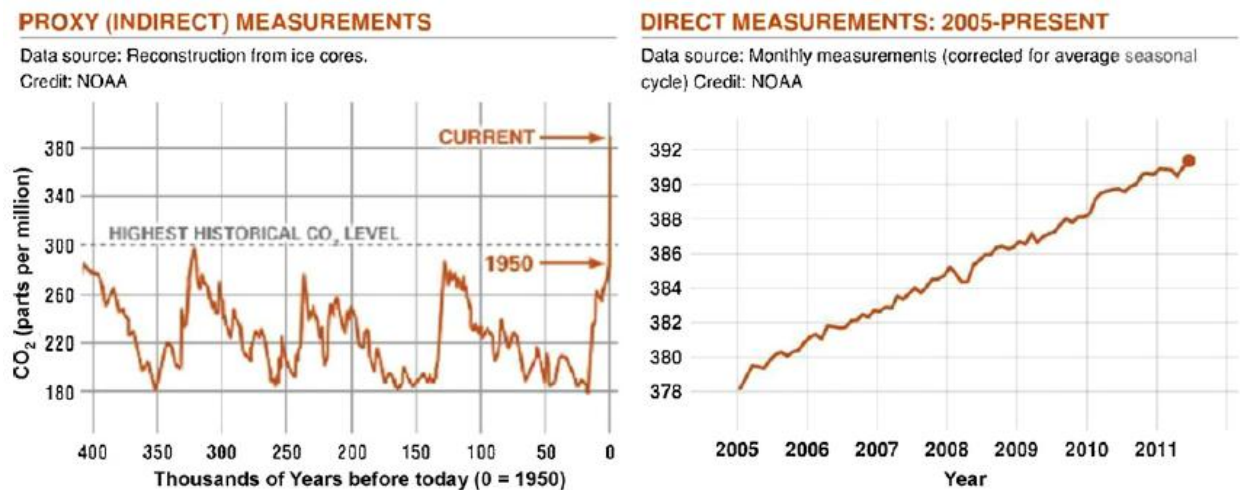


Figura 3.4: Aumento da concentração de CO₂ atmosférico. Fonte: [45].

Ao longo de toda a sua história evolutiva, a Terra tem experienciado enormes variações de temperaturas e concentrações de CO₂ atmosférico, sendo que estas só podem ser atribuídas a causas antropogênicas nos últimos 200 anos, deixando uma grande escala de tempo para as causas naturais [83].

Segundo o IPCC AR4 (2007), a maior parte do aumento observado nas temperaturas médias globais desde os meados do século XX tem origem no aumento da concentração antropogênica de gases com efeito de estufa [3]. Deste modo, grande parte da comunidade científica acredita que existe uma correlação entre o CO₂ e a mudança de temperatura da Terra, e a forma como essa relação é estabelecida é amplamente baseada nas anomalias da temperatura média e a quantidade de CO₂ presente na atmosfera em função do tempo [47] (Figura 24 e Figura 25).

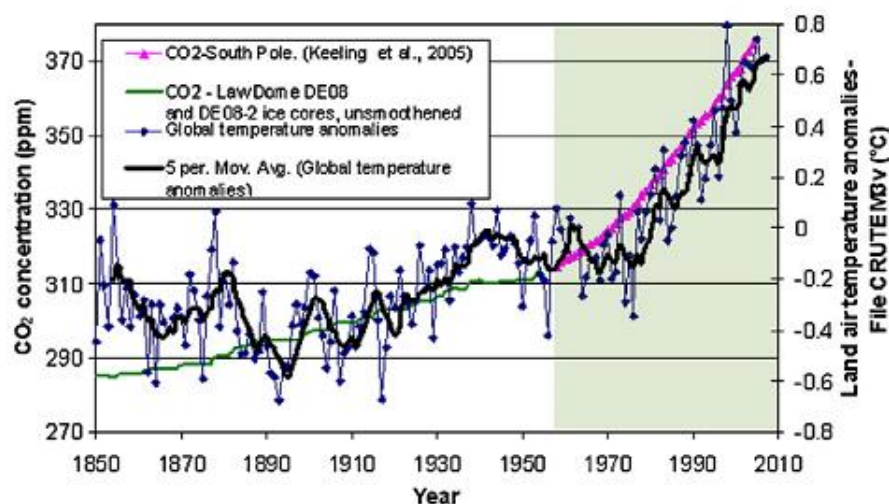


Figura 3.5: Anomalias anuais de temperaturas globais e registo de CO₂. Fonte: [47].

GLOBAL LAND-OCEAN TEMPERATURE INDEX

Source: NASA/GISS. This research is broadly consistent with similar constructions prepared by the Climatic Research Unit and the National Atmospheric and Oceanic Administration. Credit: NASA/GISS

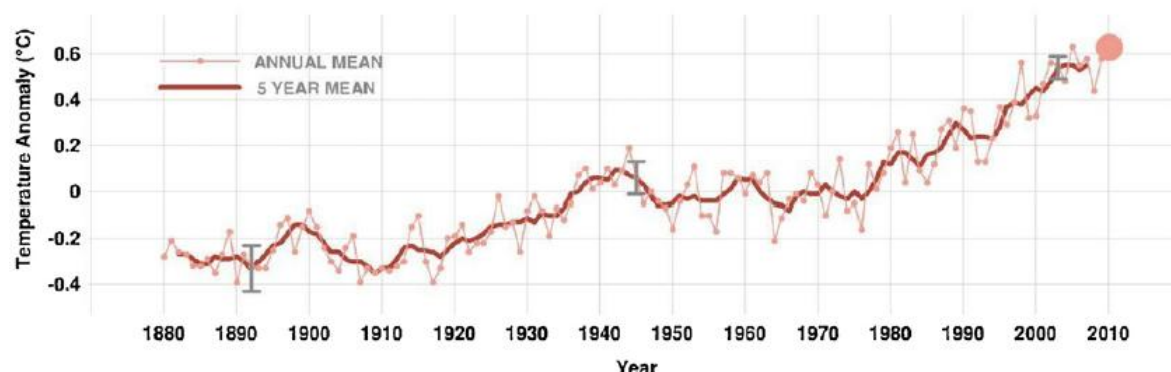


Figura 3.6: Medição da Temperatura global de superfície. Fonte: [45].

Existem três grupos principais que fazem atualmente a análise da temperatura global, o *Met Office Hadley Center* no Reino Unido, o *National Oceanic and Atmospheric Administration's (NOAA) National Climatic data Center* em Asheville na Carolina do Norte, e o *Goddard Institute for Space Studies (GISS)*, que pertence a *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, nos EUA. Todos os registos de temperatura feitos desde 1880 até à data por estes três grupos, mostram picos e valores, apesar de usarem métodos ligeiramente diferentes de medição, com tendências que mostram concordância. Todos eles mostram um aquecimento particularmente rápido nas últimas décadas, sendo que esta ultima década foi registada como a mais quente [84] [85] [86] [87].

Segundo os registos levados a cabo pelo NOAA e pelo GISS, o ano 2010 foi o ano mais quente registado, cerca de 0,66°C acima da média do século XX. Este recorde de temperatura para o ano de 2010 é notável, já que aproximadamente 6 meses deste ano foram marcados pelas fortes condições do La Niña, que traz as temperaturas frias de superfície do oceano para o leste tropical do Oceano Pacífico [88]. A temperatura média em 2012 foi aproximadamente 14,6°C (58,3°F), 0,6°C mais quente que a média registada nos meados do século XX (13,9°C). Segundo esta nova análise, a temperatura média global subiu cerca de 0,8°C (1,4°F) desde 1880, com uma taxa média por década de 0,16°C desde 1970. Quando analisadas separadamente, a temperatura média global de superfície terrestre, para o ano de 2012, foi de 0,90°C, acima da média do século XX de 8,5°C. Por sua vez, a temperatura média global oceânica, para o mesmo ano, foi 0,45°C acima da média do século XX, de 16,1°C [89] [82].

“Mais um ano de números não é por si só significativo, o que importa é que esta década é mais quente que a anterior, e que por sua vez essa década foi mais quente que a antecedeu, e por ai em diante. O planeta está a aquecer, a razão para o seu aquecimento é porque estamos a libertar quantidades crescentes de CO₂ para a atmosfera.” Segundo afirma o climatologista Gavin Schmidt da GISS [64].

4 ESTADO DE ARTE

A utilização de energia é responsável por cerca de 80% de todas as emissões de gases com efeito de estufa, fazendo com que as consequentes alterações climáticas se tornem na principal preocupação para o sector energético. As alterações climáticas e as suas implicações já começaram de certa maneira a ter impactos na sociedade, principalmente a nível socioeconómico, onde se tem vindo a observar uma desigualdade entre os países desenvolvidos e os países em vias de desenvolvimento. De facto, é importante encarar as alterações climáticas como uma preocupação mundial e procurar uma resposta internacional para um dos maiores desafios da humanidade no século XXI.

Através da queima de combustíveis fósseis, a humanidade emitiu até à data aproximadamente 1400Gt de CO₂. O problema reside no facto de ainda existirem enormes quantidades de combustíveis fósseis cuja extração é economicamente viável, dos quais 70% existe sobre a forma de carvão, que corresponde à libertação de mais 3200Gt de CO₂ para a atmosfera. No total, se queirmos todos os combustíveis fósseis existentes ainda no planeta, iríamos originar pelo menos 37000Gt de CO₂, onde por cada 1000Gt emitida corresponde a um aumento da temperatura de superfície global de 0.4°C [90].

A resposta para este desafio é simples, mas com uma realização complicada. Para continuar a satisfazer as necessidades energéticas ao nível global vai ser necessário proceder a uma ‘revolução’ energética, a uma reestruturação das economias, e tentar seguir ao máximo um caminho de descarbonização. Será necessário criar organizações e parcerias em que os governos de cada nação trabalhem em conjunto com o sector privado da indústria de energia e com os próprios consumidores, com respostas mais coordenadas, abrangentes e ambiciosas.

Existem já algumas estratégias para mitigar as alterações climáticas, uma muito conhecida é a implementação de impostos sobre as emissões de gases de efeito de estufa (GEE), algo que obriga as empresas a olhar para opções de redução mais baratas e aumentar os incentivos ao desenvolvimento de um clima mais amigável. Contudo, desenvolver algo focado somente numa perspectiva económica não será suficiente, é necessário complementar com outras campanhas de sensibilização como a otimização da eficiência energética por parte de muitas famílias, através da aplicação de normas de eficiência e conservação de energia, por exemplo através da utilização de lâmpadas fluorescentes e isolamento de edifícios [91] [51]. De acordo com IEA (*International Energy Agency*), uma melhor eficiência energética em edifícios, processos industriais e transporte pode reduzir as necessidades energéticas mundiais em 2050 até 1/3, ajudando assim no controlo de emissões de GEE [20] [92].

O desenvolvimento e a implementação de novas tecnologias com potencial de mitigação é um ponto extremamente importante para se conseguir uma economia de baixas emissões de dióxido de carbono (CO₂). A energia nuclear, as energias renováveis e a captura e armazenamento de carbono

(CAC), são algumas das promissoras possibilidades tecnológicas para o sector energético. A Agência Internacional de Energia, num relatório sobre as Perspetivas Tecnológicas de Energia para 2050, mostra que uma vasta série de tecnologias emergentes podem contribuir para uma economia de baixas emissões de CO₂, mas é necessário tornar estas tecnologias competitivas o mais rápido possível para que possam ser comercializadas no mercado internacional [9]. Apesar de todas estas soluções já discutidas e apresentadas, a sua implementação tem sido demasiado lenta. Medidas como incentivos ao investimento, medidas fiscais, tarifas preferenciais, metas quantitativas, entre outras, por parte dos governos, podem ajudar a acelerar a implementação dessas tecnologias, principalmente em países em desenvolvimento, onde ocorrerão os maiores aumentos de emissões no futuro [8].

O fácil e barato acesso a fontes primárias de energia, é o aspeto essencial do atual paradigma socioeconómico [93], e um dos principais fatores que impede que se prossiga muito mais rapidamente em direção a uma economia estável e de reduzidas emissões de carbono.

4.1 Medidas de Mitigação para as Alterações Globais

No que diz respeito aos desafios causados pelos impactes das alterações climáticas, temos duas vertentes possíveis de ação, adaptação às consequências das alterações climáticas e mitigação das mesmas através da redução das concentrações de GEE [94], sendo que no presente trabalho vamos só referir a vertente de mitigação. A crescente utilização de hidrocarbonetos e o rápido aumento de CO₂ atmosférico assim como outros GEE são responsáveis pelas grandes mudanças desfavoráveis que se estão a fazer sentir nas temperaturas globais, padrões climáticos e mudanças de paisagem e habitat natural. Indivíduos e instituições governamentais devem agir o mais rápido possível, de modo a se evitar os piores impactes das alterações climáticas. Como tal, a principal ação de mitigação para as alterações climáticas é diminuir o potencial efeito do aquecimento global, que consiste em combater as causas das alterações climáticas antropogénicas com a ajuda de ações que visam estabilizar e reduzir a concentração atmosférica de GEE, através da limitação das emissões atuais e futuras e também através do desenvolvimento de potenciais sumidouros desses gases [51] [33].

Existem várias alternativas tecnológicas para a geração de eletricidade e redução dos custos efetivos de emissões GEE. Fontes de energias renováveis e sequestro de CO₂ são dois novos conceitos com a capacidade de no futuro reduzir esses custos efetivos à medida que se procede a mais investigação na área. [51]. O leque de medidas de mitigação quer para a redução de GEE quer para o sequestro de CO₂ a longo prazo é vasto. No que diz respeito à redução de emissões temos o aperfeiçoamento da eficiência de combustão de motores, o uso de novas tecnologias como veículos híbridos e elétricos, uma melhor eficiência energética e conservação de energia em edifícios, o aumento do uso de materiais reciclados e uma mudança de combustíveis fósseis para fontes de

energia de baixo carbono (fontes de energias renováveis e biocombustíveis). Para o aumento da captura natural de GEE e sequestro de CO₂ a longo prazo temos o aumento da florestação (e redução da desflorestação), o aumento do uso de vegetação com alta produtividade de biomassa e sequestro de carbono, a combinação do uso de bioenergia com a captura e armazenamento de CO₂, e principalmente o uso de tecnologias de CCS (*carbon capture and storage*) [94] [9] [51].

A grande dificuldade da mitigação relativamente às emissões de GEE, reside no facto de a maior parte destas emissões estarem intrinsecamente ligadas às atividades que suportam o quotidiano da nossa sociedade. Não é suficiente que só alguns países criem metas de redução de GEE, é necessário que essas metas se tornem globais. Tem de existir uma cooperação entre países desenvolvidos e países em desenvolvimento, e uma coordenação de esforços entre ambos para que se consiga de algum modo arranjar soluções para este problema. O principal esforço terá que surgir dos países industrializados, os mais ricos e com mais capacidades para por em prática um orçamento de carbono sustentável que implica reduções das emissões de GEE em pelo menos 80% até 2050 e em 30% até 2030, desenvolvimento efetivo de energias alternativas e implementação de eficiência energética e outras medidas de mitigação. É também importante que exista, por parte dos países industrializados, um maior investimento no desenvolvimento tecnológico e na inovação, principalmente nos setores da energia e transporte, e que essa mesma tecnologia seja de algum modo transferida para os países com economias emergentes como meio de ajuda para a implementação de medidas de mitigação [33] [95].

Os países em vias de desenvolvimento também terão de fazer um esforço face à redução de GEE, embora maior devido às suas limitações de recursos e à prioridade necessária de alcançar um crescimento económico sustentável e redução de pobreza. Mecanismos nacionais e internacionais como *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), *United Environment Programme* (UNEP) e *International Panel on Climate Change* (IPCC), que representam os primeiros passos acordados a nível internacional para combater as alterações climáticas por meio da mitigação, favorecem a cooperação entre os países para resolver o problema climático global. Para além do esforço governamental é preciso também dar mais atenção às motivações sociais e psicológicas e tentar perceber o porquê de muitos indivíduos criarem barreiras ao seu compromisso pessoal relativamente a mitigação das alterações climáticas, apesar de demonstrarem preocupação com o futuro do clima [95] [5] [51] [33].

Consumidores e investidores devem direcionar a sua procura para fontes de energia produtoras de níveis reduzidos de carbono. Incentivos relacionados com preços mais favoráveis para as energias renováveis podem encorajar uma alteração comportamental em larga escala, assim como o atributo de preços para as emissões de carbono. Os governos, como instituições reguladoras, terão como principais funções estabelecer padrões, disponibilizar informação, permitir o desenvolvimento e investir na pesquisa, e restringir escolhas que possam vir a comprometer os esforços no combate às

alterações climáticas [95]. Muitos países em todo o mundo, nomeadamente 31 países europeus, Nova Zelândia e 10 estados dos EUA, criaram já índices de taxação de CO₂, de modo a cumprir as metas de redução de emissões de GEE propostas pelo Tratado de Quioto e pelo Protocolo de Copenhaga. Por sua vez, a China, a Coreia do Sul e algumas províncias do Canadá estão a considerar implementar essa tributação. A Índia implementou uma tributação para o carvão, que por sua vez permite criar verbas para pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de energias renováveis [51] [8].

4.2 Tecnologias de Captura e Armazenamento de CO₂ (CAC)

Neste capítulo vai ser apresentado o ‘estado da arte’ no que diz respeito a tecnologias de captura e sequestro de CO₂. Irá proceder-se a uma explicação sucinta das técnicas desenvolvidas até à data, remetendo depois o leitor para as referências consultadas, caso se pretenda mais informação sobre assunto.

A captura e armazenamento de CO₂ (CAC) é vista como um sistema de diversas tecnologias, utilizadas na mitigação das emissões de CO₂ sendo assim de grande importância no combate às alterações climáticas e em especial ao aquecimento global. Atualmente, este tipo de tecnologia tem tido um forte apoio na área da investigação tornando possível um grande desenvolvimento, que abrange uma enorme variedade de técnicas e materiais utilizados. A *International Energy Agency* (IEA), no relatório ‘*Energy Technology Perspectives 2012*’, vê a CAC como uma importante tecnologia, com um enorme potencial e com capacidade para contribuir nas despesas públicas, reduzir a dependência em relação às importações de energia e reduzir as emissões de CO₂. Por sua vez, a *European Climate Foundation*, no relatório efetuado em 2010 conhecido como *Roadmap 2050*, inclui a CAC como uma parte importante dos cenários para a descarbonização [8] [9] [51] [96] [97].

De acordo com a literatura corrente, a CAC é um sistema de tecnologias que se encontra dividido em três fases principais: captura de CO₂, transporte e armazenamento de CO₂ [9]. A fase de captura envolve a separação do CO₂ de outros produtos gasosos, para processos de queima de combustíveis como por exemplo os que acontecem nas centrais elétricas, sendo que os métodos de captura estão divididos em pré-combustão, pós-combustão e oxi-combustão. O transporte de CO₂ capturado nas centrais elétricas até um local de armazenamento adequado, há muito que é utilizado através de gasodutos. O CO₂ capturado é normalmente comprimido a densidades elevadas para facilitar tanto o transporte como o armazenamento. A última fase corresponde ao armazenamento de CO₂, existem diversos métodos com grande potencial tais como a injeção de CO₂ em formações geológicas subterrâneas, injeção no oceano profundo, a carbonatação mineral, e o armazenamento biológico, que inclui o armazenamento por fotossíntese quer por microrganismo unicelulares quer

por vastas extensões de florestas, também conhecidas como sendo grandes sumidouros naturais de CO_2 [98] [96] [99] [100].

4.2.1 Opções de Captura de CO_2

4.2.1.1 Captura Pré-Combustão

Num sistema de pré-combustão, como o nome indica, a captura do CO_2 ocorre antes da combustão e envolve a oxidação parcial do combustível sólido. A pré-combustão é relevante para as centrais de produção de energia com ciclo combinado de gaseificação integrada, principalmente para as centrais de carvão, pois oferecem um potencial para eficiências mais elevadas e uma redução de custos para o controlo de emissões poluentes. Neste método, o combustível primário vai reagir tanto com o vapor como com o oxigénio para a decomposição química do combustível e para a produção do gás de síntese, constituído principalmente por monóxido de carbono (CO) e hidrogénio (H_2). Após a sua produção, o gás de síntese é então processado num reator reforma a vapor (*'water-gas-shift'*), que vai converter o CO em CO_2 , aumentando as concentrações moleculares de CO_2 e H_2 para aproximadamente 40% e 55%, respetivamente. O CO_2 que se encontra a alta pressão, é então separado, com a ajuda de um solvente físico normalmente *rectisol* ou *selexol*, e enviado para a unidade de compressão, enquanto o H_2 é purificado para a posterior utilização na produção de eletricidade (Figura 26) [98] [99] [100] [101].

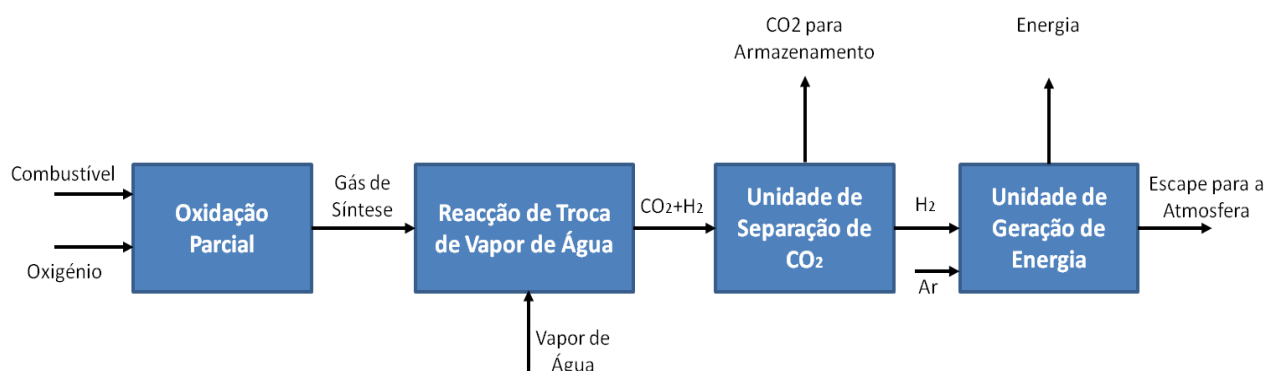


Figura 4.1: Esquema do sistema de captura de pré-combustão. Fonte: [100].

4.2.1.2 Captura Pós-combustão

Este método representa a captura de CO_2 depois da combustão. Todo o processo que antecede a combustão é similar aquele que decorre nos típicos sistemas de geração de energia, onde o combustível primário é queimado na presença de ar, e cuja formação de vapor permitirá a produção de energia. Durante o processo de combustão temos a formação dos gases de combustão, constituídos maioritariamente por azoto (N_2) e pequenas concentrações de CO_2 (3-15%). A captura pós-combustão envolve assim a separação do CO_2 desse gás de combustão. Para ajudar na captura

do CO_2 , cuja percentagem é pequena, esta tecnologia requer uma lavagem utilizando um solvente amina (monoetanolamina (MEA)). Este solvente vai reagir com o CO_2 no gás de combustão, produzindo um fluxo de CO_2 purificado adequado para a compressão e o futuro armazenamento (Figura 27) [98] [100] [101] [99].

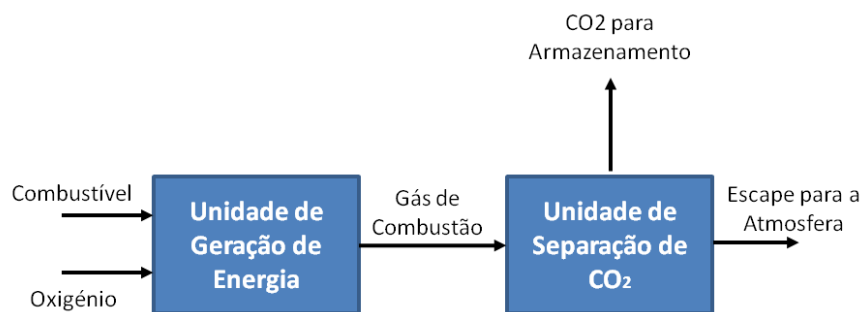


Figura 4.2: Esquema para a captura pós-combustão. Fonte: [100].

4.2.1.3 Oxi-Combustão

A principal característica da oxi-combustão é a utilização de O_2 em vez de ar na queima do combustível fóssil utilizado, a reação do combustível com o O_2 vai dar origem a um gás de combustão constituído principalmente por H_2O e CO_2 , mas também alguns componentes oxidados (SO_2/SO_3), N_2 e Ar devido às impurezas do O_2 e possíveis fugas de ar. O processo consiste na separação do O_2 do ar, de modo a se atingir um estado de pureza de O_2 ($>95\%$), depois este é enviado para a unidade de conversão de energia onde se vai misturar com o gás de combustão reciclado de CO_2 concentrado, a combustão ocorre a seguir num ambiente de mistura O_2/CO_2 , tendo como resultado um gás de combustão constituído por CO_2 e H_2O . A H_2O é facilmente removida através da condensação. Segue-se a purificação do CO_2 , as partículas e os compostos de enxofre são removidos. O volume de CO_2 em base seca pode variar entre os 70-95%, consoante o tipo de combustível utilizado, do processo, da perda de ar, da pureza do CO_2 e do excesso de O_2 . Após a remoção de SO_2 , o CO_2 é comprimido para armazenamento ou transporte (Figura 28) [101] [98] [99] [100].

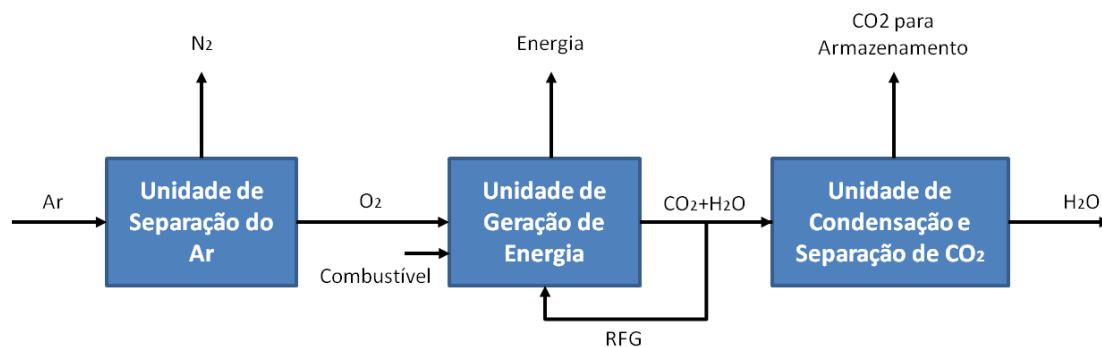


Figura 4.3: Esquema para a oxidação-combustão. Fonte: [100].

COMPARAÇÃO DOS TRÊS MÉTODOS

Os atuais sistemas de pós-combustão e pré-combustão para centrais de energia conseguem capturas de CO_2 produzido em cerca de 85-95%. A presença de concentrações mais elevadas de CO_2 no gás de síntese torna a sua captura menos dispendiosa para o sistema de pré-combustão comparativamente com o sistema de pós-combustão. Os sistemas de pós-combustão apresentam uma eficiência térmica mais elevada para a conversão em eletricidade que os sistemas de pré-combustão de ciclo combinado de gaseificação integrada (CCGI). Os sistemas de oxidação-combustão são capazes de capturar praticamente todo o CO_2 produzido. Contudo, a necessidade de um tratamento adicional de gás para remover os poluentes diminui ligeiramente a captura de CO_2 para um pouco mais de 90% (Tabela 17 e Tabela 18) [99] [100] [102].

Tabela 4.1: Comparação de benefícios para as tecnologias de pós-combustão, pré-combustão e oxi-combustão. Adaptado de [103].

Tecnologias	Vantagens	Desvantagens
Pós-combustão	<ul style="list-style-type: none"> -Tecnologia evoluída para outras aplicações (ex.: separação de CO₂ a partir de gás natural) -padrão de retroação da capacidade de geração de energia existente -Avanços tecnológicos e reduções de custos possíveis com desenvolvimento adicional 	<ul style="list-style-type: none"> -penalidades energéticas elevadas (~30%) -Custo elevados
Pré-combustão	<ul style="list-style-type: none"> -menores custos que a captura de pós-combustão -penalidades energéticas mais baixas do que a captura pós-combustão -altas pressões de CO₂ reduzem custos de compressão -combinação com a produção de H₂ para o setor de transporte -avanços tecnológicos e possíveis reduções de custo com o desenvolvimento adicional 	<ul style="list-style-type: none"> -processo químico complexo necessário para a gaseificação -reforço de potência necessário para a capacidade existente -reforço de potência necessita de um grande investimento de capital
Oxi-combustão	<ul style="list-style-type: none"> -evita a necessidade da complexa separação na captura de pós-combustão -geração de eficiências potencialmente mais elevadas -avanços tecnológicos e possíveis reduções de custo com desenvolvimento adicional 	<ul style="list-style-type: none"> -novos materiais de altas temperaturas são necessários para otimizar o desempenho -é necessário uma unidade de separação de oxigênio no local -reforço de potência necessário para a capacidade existente

Tabela 4.2: Comparação de Centrais de energia com e sem a captura de CO₂. Adaptado de [104].

Tecnologias	Eficiência Térmica (% LHV)	Custo de Capital (\$/KW)	Custo de Eletricidade (c/kWh)	Custo de CO₂ evitado (\$/tCO₂)
Centrais a Gás				
Sem captura	55.6	500	6.2	-
Pós-combustão	47.4	870	8.0	58
Pré-combustão	41.5	1180	9.7	112
Oxi-combustão	44.7	1530	10.0	102
Centrais a Carvão				
Sem captura	44.0	1410	5.4	-
Pós-combustão	34.8	1980	7.5	34
Pré-combustão	31.5	1820	6.9	23
Oxi-combustão	35.4	2210	7.8	36

4.2.1.4 Looping Químico de Combustão

É um conceito de combustão com oxigénio que ainda está numa fase inicial de desenvolvimento. Este método consiste na prevenção de diluição do CO₂ com o gás de combustão ao se evitar contato direto entre o combustível e o ar de combustão. O O₂ necessário à combustão é transferido do ar de combustão, através de um óxido de metal, para o combustível. Os óxidos de metal com maior potencial são: níquel, cobalto, ferro, cobre e manganésio [98] [100].

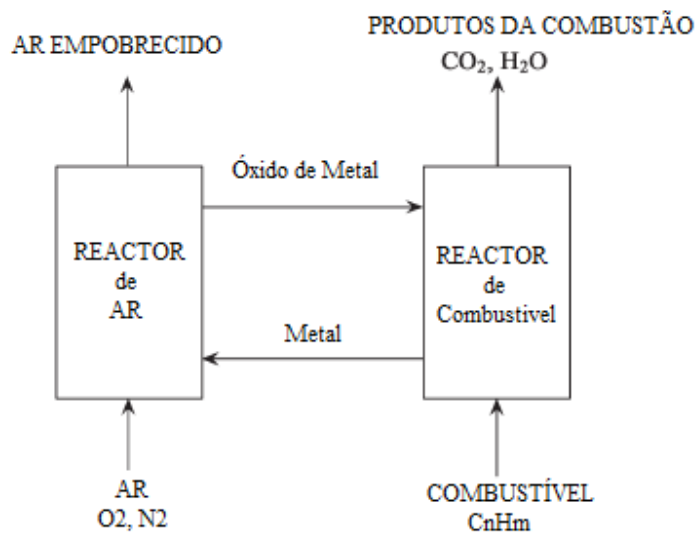


Figura 4.4: Sistema Looping-Químico de Combustão. Adaptado de [101].

O sistema LQC (Figura 29) é formado por dois reatores interconectados, denominados por reator de ar e o reator de combustível. No reator de ar, o O₂ transportado vai ser oxidado com o ar. Enquanto no reator de combustível o O₂ transportado é reduzido pela oxidação do combustível através da seguinte reação:



O fluxo de gás de saída do reator de combustível, resultante da combustão completa que se dá no reator, vai conter CO₂ e vapor de água condensável [98] [100]. Após o arrefecimento e condensação do vapor de água, o CO₂ é recuperado, sendo necessária pouca energia para a separação do componente [100].

Este sistema apresenta várias vantagens em comparação com os processos de combustão convencionais, na LGC a geração total de calor é igual ao calor de combustão logo não há quaisquer ganhos de entalpia, outra vantagem é a separação de CO₂ e H₂O sem gastos adicionais energéticos. Como o combustível é queimado no reator de combustível com a ausência de ar, existe uma minimização da formação de NO_x.

Contudo, e para além de ter perspectivas promissoras, esta é ainda uma tecnologia em fase de desenvolvimento, mais investigação tem de ser feita no sentido de se ultrapassar alguns obstáculos tecnológicos existentes. Outra desvantagem do sistema é que o O₂ transportado está sujeito a stresses técnicos e químicos podendo resultar num pior desempenho.

4.2.2 Técnicas de Captura de CO₂

Existem várias tecnologias disponíveis para a captura do CO₂ a partir de centrais de produção de energia de combustíveis fósseis. Estas incluem principalmente a absorção física e química, a adsorção, o processo criogénico e a tecnologia de membrana (Figura 30) [103].

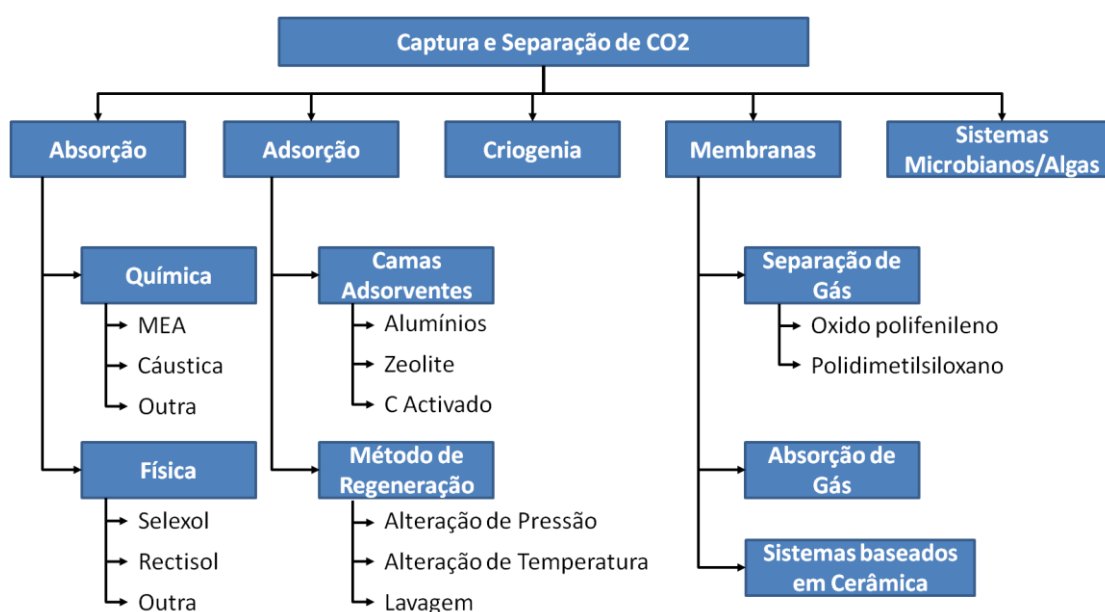


Figura 4.5: Opções tecnológicas para a captura e separação de CO₂. Adaptado de [103].

4.2.2.1 Processo de Absorção

Processo de absorção pode ser químico ou físico, são amplamente utilizados em centrais energéticas de petróleo, gás natural e carvão. A absorção de gases consiste na separação de um ou mais componentes de um fluxo gasoso, através do contacto com um solvente líquido, onde vai ocorrer a dissolução desses componentes. Por sua vez, a desabsorção é o processo inverso em que o componente na sua fase líquida passa para a fase gasosa.

A absorção tem por base a afinidade preferencial de um solvente químico com o soluto, no caso de absorção de CO₂ o solvente vai dissolver o CO₂ mas não dissolve outros componentes do gás de exaustão, como o oxigénio e o nitrogénio. A solução rica em CO₂ é então transportada para uma coluna de regeneração, onde vai ocorrer a separação do CO₂ da solução e a regeneração do solvente. A regeneração do solvente implica o aumento da temperatura e pressão na coluna de

desabsorção, também denominada de coluna regeneradora. Nesta o CO₂ quase puro é conseguido no topo da coluna regeneradora após a condensação do vapor de água. O CO₂ é então comprimido e enviado para armazenamento (Figura 31) [99] [100] [102].

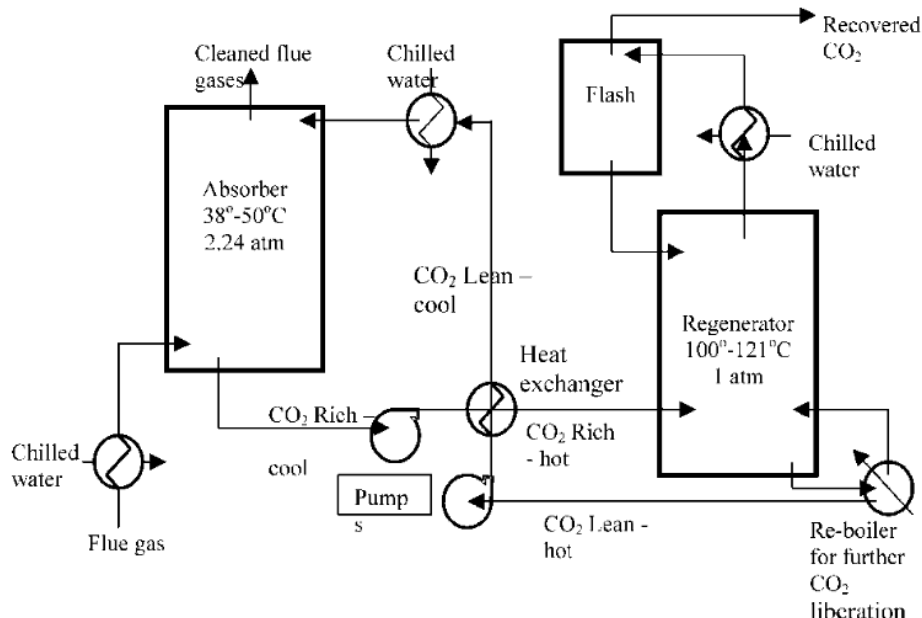


Figura 4.6: Esquema de um típico sistema de absorção química. Fonte: [102].

O processo de absorção é a opção mais viável para o método de captura de pós-combustão. A absorção química é favorável para a separação a baixa pressão, como por exemplo nos ciclos de vapor e carvão pulverizado e nos ciclos combinados de gás natural, mas são necessárias grandes quantidades de energia. A absorção física é indicada para a separação a alta pressão, como os ciclos combinados de carvão com gaseificação integrada, sendo necessárias baixas quantidades de energia [100].

A absorção química com solventes químicos à base de amina é muito utilizada na captura de CO₂ de fluxos de gás com baixa pressão. Esta utiliza geralmente solventes químicos como monoetanolamina (MEA), dietanol amina (DEA), N-metildietanolamina (MDEA) e di-2-propanolamina (DIPA) [100]. Os problemas associados com a utilização de solventes químicos são a corrosão da coluna de absorção e a enorme quantidade de energia que é necessária para o processo de regeneração dos solventes [98]. Assim, será necessário proceder a mais pesquisa de modo a se minimizar os custos de regeneração, por meio de novos métodos de regeneração de solventes ou até mesmo o uso de novos solventes, modificação de dispositivos de contacto gás-líquido, e desenvolvimento de inibidores de corrosão e degradação, para que a aplicação desta tecnologia seja feita com sucesso [100]. Este processo poderá ser aplicado em centrais termoeletricas a carvão pulverizado com potência entre 300-1100MW, em centrais termoeletricas

por leito fluidizado, com circulação interna, a carvão e biomassa com potência entre 50-400MW e em centrais termoeletricas de ciclo combinado a gás natural [105].

A absorção física é normalmente utilizada quando a pressão de exaustão e as concentrações de CO₂ são muito elevadas, como é o caso das centrais com ciclos de combustão de gaseificação integrada. Os solventes físicos normalmente utilizados são o *rectisol*, o *selexol* e o *purisol*. É muito que a absorção física é utilizada por várias indústrias, tais como, indústria de petróleo, gás natural e química, para a remoção de gases como H₂O e CO₂ e produção de H₂ [102].

4.2.2.2 Processo de Adsorção

No processo de adsorção existem significativas forças intermoleculares entre os gases (incluindo o CO₂) e as superfícies de materiais sólidos, isto é, é um processo físico que envolve a fixação de um gás ou líquido a uma superfície sólida. Os adsorventes que podem ser aplicados na captura de CO₂ incluem o carvão ativo, a alumina, os óxidos metálicos e os zeólitos. Dependendo da temperatura, força de superfície, pressão parcial e tamanho dos poros de adsorção, camadas simples ou múltiplas de gases são adsorvidas [100] [102].

Um adsorvente de CO₂ deve apresentar uma elevada seletividade e boa capacidade de adsorção, rápida cinética de adsorção e dessorção, boa estabilidade física e química através da adsorção/ciclos de dessorção, e poder ser regenerado através de alterações de pressão e temperatura de modo a se minimizar os custos de operação. Outro fator a ter em conta é a energia operacional do adsorvente selecionado, esta deve apresentar um bom rendimento na presença de humidade ou outros contaminantes, presentes na alimentação de gás para a unidade de tratamento de adsorção [106].

No processo uma coluna cheia é maioritariamente preenchida por um adsorvente esférico e um fluxo de rolamento de CO₂, que vai passar pela coluna. Ao atravessar a coluna, o CO₂ vai ser atraído na direção do adsorvente aderindo à sua superfície [100]. Os adsorventes usados no sequestro do CO₂ são molecularmente formados por conjuntos de malhas que operam como crivos à passagem da corrente gasosa, fixando aí o CO₂. Após atingido o equilíbrio, a dessorção ocorre de modo a se conseguir obter o CO₂ na sua forma pura e o adsorvente utilizado é regenerado, podendo ser utilizado em novos ciclos [100]. A libertação do CO₂ e a regeneração do adsorvente são conseguidos através de alterações das condições de temperatura e pressão [102].

O processo de regeneração do adsorvente é conseguido com a utilização das várias capacidades de adsorção a diferentes temperaturas e pressões, tais como a '*Pressure Swing Adsorption*' (PSA), a '*Temperature Swing Adsorption*' (TSA) e a '*Electrical Swing Adsorption*' (ESA) [106].

Na PSA, a mistura gasosa circula no leito a uma elevada pressão (400-2000kPa) e a uma baixa temperatura, até que a adsorção do CO₂ atinga as condições de equilíbrio perto do local de saída do

leito. Na fase de adsorção parte do gás sai da coluna como um produto, cuja corrente é formada pelos componentes menos adsorvidos. Após a retenção do CO_2 no leito do material, este irá sofrer uma regeneração, com a redução da pressão, refinando assim os constituintes adsorvidos, estando de novo prontos para outro ciclo de adsorção [100] [106].

Na TSA, é um processo semelhante ao anterior, com a diferença de que a regeneração do material é feita pelo aumento da temperatura. A temperatura do leito pode ser aumentada pela adição de um gás quente, inerte e não-adsorvente ou, menos frequentemente, através da transferência de calor por resistências de aquecimento. Depois da dessorção, a temperatura do leito diminui com o gás de purga fresco e o ciclo de adsorção recomeça [106]. Este requerimento adicional de calor torna mais caro esta tecnologia, comparativamente com a PSA [100].

Na ESA, utiliza-se uma corrente elétrica de baixa voltagem que passa pelo adsorvente. O material utilizado é a fibra de carvão, uma vez que esta possui uma elevada condutividade, permitindo aos gases adsorvidos uma rápida libertação através da utilização de uma corrente elétrica de baixa voltagem. A pressão do sistema não varia muito e a temperatura é minimamente alterada. Comparativamente com as outras tecnologias de adsorção, a ESA é capaz de tornar o processo de captura de CO_2 mais rentável [100].

Para uma aplicação a grandes escalas em centrais energéticas de gás de combustão, o processo de adsorção pode ser não o mais adequado. A essa escala a capacidade de adsorção da maior parte dos adsorventes disponíveis apresenta grandes desafios, por causa das diferentes solubilidades que os componentes gasosos apresentam num sólido [102].

4.2.2.3 Processo Criogénico

A separação criogénica tem como princípio a separação do CO_2 do fluxo de gás de combustão através da condensação. É um processo utilizado a nível comercial para tecnologias de captura de CO_2 de oxi-combustão, porque é adequado para tratamentos de fluxos de gás de combustão com elevadas concentrações de CO_2 ($> 50\%$) [100] [102].

Na separação criogénica todos os componentes do gás de combustão são removidos antes do arrefecimento, à exceção do N_2 e do CO_2 . Após a remoção total de todos os outros gases (NO_x , SO_x , O_2 e H_2O) e partículas, o restante gás é então enviado para a câmara criogénica onde a temperatura e a pressão vão ser manipuladas até que a liquefação do CO_2 ocorra. O CO_2 sofre condensação a uma temperatura de $-56,6^\circ\text{C}$ e a 7,4 atm, enquanto o N_2 permanece na forma gasosa. A destilação permite que o N_2 exale através de uma saída no topo da câmara, enquanto o CO_2 líquido altamente concentrado é recolhido no fundo da câmara [107] [100].

Existem algumas vantagens da separação criogénica comparativamente com outras tecnologias de separação de CO_2 , tais como a produção direta de CO_2 líquido, forma ideal para o seu transporte

via gasodutos e navios, não é necessária a utilização de um absorvente químico, o processo opera à pressão atmosférica e a recuperação do CO₂ é muito elevada (a pureza do CO₂ depois da destilação pode exceder os 99,95%) [107] [100] [102].

Por outro lado, este é um processo muito dispendioso energeticamente, a energia necessária para manter o sistema frio torna o processo ineficaz economicamente. Outra desvantagem é o elevado teor de água no fluxo de alimentação e a presença de outros gases como NO_x, SO_x e O₂, que no seu conjunto interferem com o arrefecimento, causam corrosão e entupimentos, resultando numa diminuição da eficiência. Como tal, é necessário remover quaisquer vestígios de água e o conjunto de outros gases presentes no fluxo de alimentação o que leva a um aumento do custo total do processo [107] [100] [102].

4.2.2.4 Membranas

O uso de membranas seletivas para a separação de componentes gasosos a partir de um fluxo de gás é um conceito recente, e pode ser utilizada na separação de CO₂ do gás de combustão em sistemas de pós-combustão, de CO₂ do gás natural, de CO₂ a partir de H₂ em sistemas de pré-combustão ou O₂ a partir de azoto em sistemas de oxi-combustão [100].

As membranas são barreiras semipermeáveis, com a capacidade de deixar passar alguns componentes e reter outros, através de vários mecanismos diferentes. As membranas podem ser constituídas por diferentes tipos de materiais, podem ser orgânicos (polimérico) ou inorgânicos (carbono, zeólito, cerâmico ou metálico), porosos ou não-porosos [100] [101].

Para uma membrana ser vantajosa na captura de CO₂ deve apresentar as seguintes características [108]:

- Alta permeabilidade para o CO₂
- Alta seletividade para CO₂/N₂
- Resistência térmica e química
- Resistência à plastificação
- Resistência ao envelhecimento
- Custo efetivo
- Capacidade de fabricação de baixo custo para os diferentes módulos de membranas

Propriedades interessantes de seletividade e/ou permeabilidade para o CO₂ têm sido demonstradas pelas seguintes categorias de membranas [108]:

- Poliamidas (*polyimides*)
- Transporte facilitado

- Matriz mista
- Crivos moleculares de carbono
- Óxido de poliéster (PEO)

A captura de CO_2 por membranas pode ser feita através de membranas de absorção de gás e através de membranas de separação de gás.

O processo de captura de CO_2 por membranas de absorção de gás (figura 29) consiste na utilização de membranas sólidas microporosas como dispositivos de contato entre o fluxo de gás e o solvente líquido [100] [102]. Para se dar a separação do CO_2 do gás de combustão, este tem de ser difundido na membrana sendo recuperado por meio de um absorvente líquido. Devido a uma constante e elevada força de condução, este processo apresenta uma maior taxa de remoção que a membrana de separação de gás [100]. Para permitir a passagem do CO_2 pela membrana, as pressões de ambos os lados têm de ser iguais, sendo que a eficiência da separação vai depender da pressão parcial do CO_2 . Assim, as membranas de absorção são adequadas para as elevadas concentrações de CO_2 (>20%) nos fluxos de gás de combustão (Figura 32) [102].

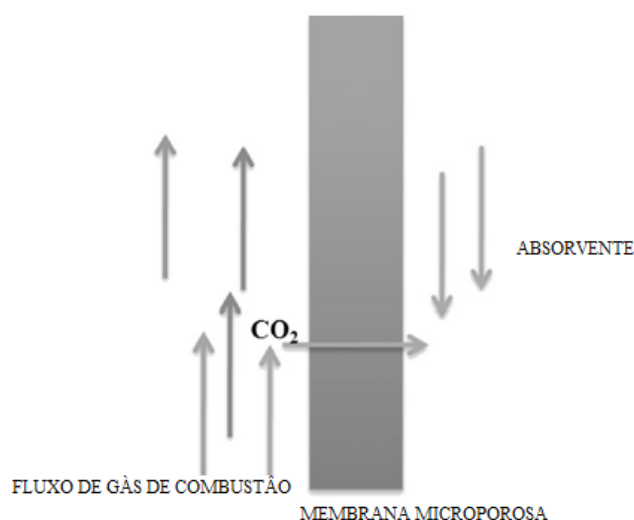


Figura 4.7: Membrana de Absorção de Gás. Adaptado de [100].

O processo de captura de CO_2 por membranas de separação de gás (Figura 33) tem como parâmetros principais de operação a seletividade e a permeabilidade, onde a seletividade é fornecida pelas próprias membranas [100] [102]. Os poros da membrana operam como agentes de permeabilidade preferencial, permitindo assim a difusão mais rápida de um componente, de entre os vários que vão estar presentes da mistura. As taxas de permeabilização vão variar consoante a dimensão relativa das moléculas ou coeficientes de difusão no material da membrana [102].

Neste processo, o fluxo de gás com CO₂ é inserido em várias colunas cilíndricas ocas dispostas em paralelo, o CO₂ é então selecionado e passa pela membrana. Uma vez do outro lado da membrana o CO₂ é recuperado a uma pressão reduzida [100]. Como a separação dos gases é feita através da difusão das moléculas do gás na membrana, a força motora para a permeabilidade vai ser a diferença da pressão parcial dos componentes de ambos os lados da membrana. Existem vários tipos de membranas de separação de gás: cerâmica, polimérica, e a combinação de ambos os materiais [100] [102].

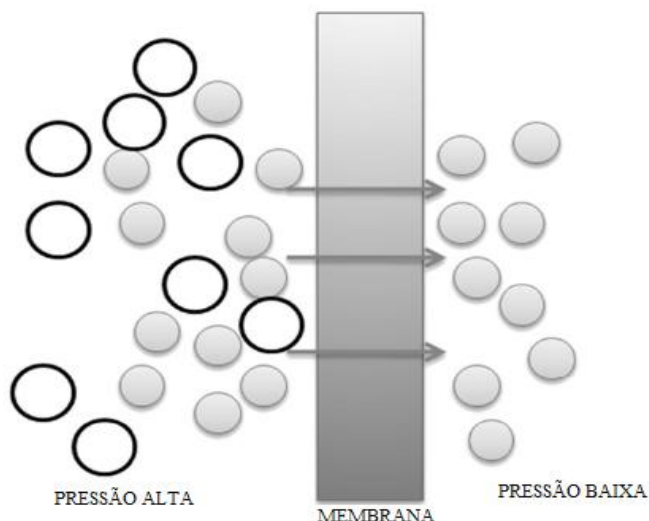


Figura 4.8: Membrana de Separação de Gás. Adaptado de [100].

O principal problema para a limitada aplicação desta tecnologia é a baixa concentração de CO₂ e a baixa pressão do fluxo do gás de combustão, como resultado é necessária a utilização de membranas com elevada seletividade para uma recuperação de CO₂ de 80% [108]. Outro aspeto que é importante ter em conta é que a energia necessária associada às membranas de separação de CO₂ está relacionada com a concentração de CO₂ presente no fluxo do gás de combustão. Para fluxos com cerca de 10% de CO₂, a energia necessária é muito maior comparativamente com o método de absorção. Por outro lado, para fluxos com cerca de 20% de CO₂ ou mais, a energia necessária é comparável ou até mesmo menor que a dos métodos de adsorção, como tal, o uso de membranas com uma seletividade de 60 (permeabilização superior a 330 nmolm⁻²s⁻¹Pa⁻¹) envolve recuperações de CO₂ e composições de permeabilização razoáveis com custos mais baixos que a amina [108].

Atualmente, a Pesquisa Tecnológica de Membranas (PTM) está a desenvolver estudos para membranas de compósito de polímero (fina película) e configurações associadas ao processo de modo a se conseguir aumentar o fluxo de CO₂ que atravessa a membrana, reduzindo assim a área de membrana necessária. Este método, denominado por Membrana Polaris PTM, apresenta uma

permeabilidade dez vezes superior e com a mesma seletividade para o CO₂/N₂. Outro estudo sobre membranas aplica-se às membranas de transporte facilitado com grupos de anidrase carbônica (CA), que favorecem a penetração do CO₂ e que tem sido validado com testes laboratoriais com uma permeação de 0,5m³, obtendo-se como resultado recuperações de CO₂ em cerca de 85% a partir de fluxos com 25% de CO₂ [108].

4.2.3 Transporte de CO₂

O Transporte de CO₂, quando referido na cadeia de CAC, consiste na ligação entre os locais de produção de CO₂ e as instalações de injeção para os diversos métodos possíveis de armazenamento. O transporte de CO₂ pode ser feito através de gasodutos, navios, via rodoviária e ferroviária, nos seus três estados: gasoso, líquido e sólido [3].

À pressão e temperatura ambiente, o CO₂ está sob a forma de um gás e apresenta uma massa volumica 1,5 vezes superior à do ar atmosférico. Pretende-se que a captura do CO₂ ocorra a grandes escalas, mas como nas condições ambiente este ocuparia muito espaço é necessário comprimi-lo, de modo a permitir o seu transporte e armazenamento. A solidificação do CO₂ exige enormes quantidades de energia, comparativamente com a sua compressão e liquefação, não sendo uma opção viável do ponto de vista energético. Deste modo, a forma mais adequada para o transporte de CO₂ é uma aproximação às suas condições e gases de petróleo liquefeito (GPL), especialmente propano e butano [103].

De entre todas as opções de transporte disponíveis, o transporte via gasodutos, marítimos (*offshore*) e terrestres (*onshore*), e o transporte de navios são aqueles que se revelam mais adequados principalmente do ponto de vista económico. Ambas estas opções de transporte são amplamente utilizadas comercialmente para o transporte de hidrocarbonetos, sendo assim os meios mais adequados para o transporte de grandes quantidades de volume de CO₂. Relativamente ao transporte de menores quantidades de CO₂, é frequente que este seja feito por via rodoviária ou ferroviária, embora estes métodos de transporte apresentem custos mais elevados [103] [10].

Existem já alguns exemplos de projetos na Europa que utilizam o método de transporte de CO₂ através de gasodutos, nomeadamente o projeto *Snhovit*, onde um gasoduto *offshore* transporta o CO₂ de uma central de processamento de gás Norueguesa até um local de injeção no Mar do Norte, e o projeto *Paulacq*, onde o CO₂ separado de uma exploração de gás natural no sul da França é transportado por um gasoduto *onshore* até um local de armazenamento num reservatório de gás natural esgotado. Estes casos europeus foram especificamente construídos com o intuito de mitigação das emissões de CO₂ [10].

4.2.4 Armazenamento de CO₂

4.2.4.1 Armazenamento Geológico

O armazenamento geológico consiste na injeção de CO₂ antropogénico em reservatórios de petróleo e gás extintos, jazidas de carvão e aquíferos salinos profundos, onde existe uma adequada porosidade e impermeabilidade que permite manter o CO₂ retido por longos períodos de tempo. A injeção tem de ser feita a profundidades superiores a 1km, a temperaturas acima do valor crítico para o CO₂ (31,1°C) e a pressões elevadas de modo a se conseguir obter densidades da ordem de 500kg/km³. Em qualquer caso é necessário assegurar que o reservatório é sobreposto por rochas impermeáveis (o material selante) que impeçam a ascensão do CO₂. [103] [104] [109].

RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO E GÁS EXTINTOS

Os reservatórios de hidrocarbonetos no fundo são armadilhas estruturais ou estratigráficas que se encontram no topo de aquíferos, que foram por sua vez preenchidos com petróleo e/ou gás durante o processo de geração, migração e acumulação de hidrocarbonetos. A injeção de CO₂ num reservatório de petróleo vai fazer com que o petróleo bruto que aí existe reduza a sua viscosidade, aumentando assim a sua capacidade de recuperação em 7-13%. A recuperação estimulada de petróleo e gás é feita através de atividades como EOR (*Enhanced Oil Recovery*) e EGR (*Enhanced Gas Recovery*), estas técnicas permitem a extração de petróleo e gás de campos quase extintos. Uma contrapartida deste tipo de injeção é que quantidades consideráveis de CO₂ podem ser trazidas de novo à superfície juntamente com o petróleo [103] [110] [109]. Por sua vez, os reservatórios de gás extintos só podem ser utilizados para o armazenamento de CO₂ se não se encontrarem contaminados por água subterrânea [103].

AQUÍFEROS SALINOS

Os aquíferos salinos profundos são formações salinas constituídas por rochas porosas saturadas (ex.: salmoura) e tamponadas por várias formações rochosas impermeáveis. O CO₂ injetado nestas formações geológicas pode ser armazenado de três maneiras diferentes, por aprisionamento por salinidade, onde o CO₂ fica dissolvido na água subterrânea; por aprisionamento hidrodinâmico, onde o CO₂ fica aprisionado na forma de gás ou fluido supercrítico; ou através da reação direta ou indireta do CO₂ com os minerais aí existentes que leva à precipitação de carbonatos secundários [103] [110].

JAZIDAS DE CARVÃO

Nas jazidas de carvão, o armazenamento de CO₂ pode ser feito por três mecanismos distintos, através da adsorção sobre as superfícies internas do carvão, através da absorção dentro da estrutura molecular do carvão, e através da absorção dentro dos poros de fraturas naturais do carvão. Um fator importante na escolha do local de armazenamento adequado para as jazidas de carvão é a sua permeabilidade. Em Minas de carvão não exploradas, que se encontram a profundidades mais elevadas do que os limites de recuperação convencionais, o carvão pode ser recuperado através da utilização de CO₂, método conhecido como ‘*Enhanced Coal Bed Methane*’ (ECBM). A maior parte dos diferentes tipos de carvão que existem contêm metano adsorvido, mas em condições PT, o carvão vai adsorver quantidades mais elevadas de CO₂ e libertar o metano (CH₄). O metano que é libertado apresenta valor acrescentado do processo de captura e sequestro de CO₂, diminuindo desse modo os custos de exploração [103].

Tabela 4.3: Capacidade de armazenamento de CO₂ nas diferentes opções de armazenamento geológico. Fonte: [103].

Tipo de Reservatório	Capacidade mínima de armazenamento (GtCO₂)	Capacidade máxima de armazenamento (GtCO₂)
Reservatórios de petróleo e gás natural	675	900
Jazidas de Carvão	3-15	200
Aquífero Salino profundo	1000	10 ⁴ *

*valor incerto

Estima-se que em reservatórios de gás e petróleo extintos exista uma capacidade de armazenamento entre 675-900GtCO₂. Em formações salinas as estimativas apontam para uma capacidade de pelo menos 1000GtCO₂, podendo essas localizações apresentarem uma capacidade 10 vezes superior.

A injeção de CO₂ em profundas formações geológicas abrange várias das tecnologias desenvolvidas para a exploração de petróleo, de gás e para a indústria de produção. A capacidade de permanência de CO₂, a segurança, e outras questões relacionadas com o armazenamento geológico a longo prazo, variam consoante o local geográfico e as características e potencial do reservatório utilizado, como tal, tecnologias de perfuração de poços, simulações computacionais da dinâmica de armazenamento e métodos de monitorização de aplicações existentes têm sido alvo de investigação e desenvolvimento específico ao armazenamento geológico [103] [104] [109] [45].

4.2.4.2 Armazenamento Oceânico

Os oceanos são o principal sumidouro natural de CO₂ do planeta, isto deve-se ao facto de os oceanos armazenarem mais CO₂ que a vegetação terrestre [111]. Os oceanos removem grandes quantidades de carbono atmosférico, criando assim um equilíbrio natural, deste modo à medida que a concentração de CO₂ aumenta na atmosfera o CO₂ nas águas oceânicas aumenta também.

O CO₂ pode ser armazenado nos oceanos por duas vias naturais diferentes, através da solubilidade deste na água e através da sua fixação por fotossíntese. As águas com elevadas concentrações de CO₂ são transportadas para o fundo oceânico, através das correntes convencionais e correntes oceânicas, onde permanecem durante longos períodos de tempo. O carbono que é fixado por organismos marinhos através da fotossíntese fica armazenado no sedimento após a sua morte, quando estes descendem num fluxo vertical até ao fundo do oceano [112] [109]. Outra opção de armazenamento de CO₂ é a injeção de CO₂ capturado diretamente no oceano profundo (> 1000m) ou na coluna de água, através do transporte do mesmo em gasodutos ou navios. Contudo, este tipo de metodologia só foi testada em laboratórios e em modelos matemáticos, sendo incerta a forma como irão reagir os ecossistemas a uma rápida injeção de CO₂ no meio [109].

Existem várias limitações quer para o armazenamento natural, quer para o artificial. Uma das grandes limitações para a taxa de sequestro biológica nos oceanos é a disponibilidade de nutrientes, como resposta a essa limitação tem sido sugerido a fertilização dos oceanos. Este processo consiste na estimulação da fixação de CO₂ ao se introduzir os nutrientes necessários de modo a se aumentar a produção de fitoplâncton. Contudo, este tipo de intervenção tem sido muito discutida por causa da possível alteração das estruturas do plâncton e das grandes quantidades de matéria orgânica decomposta no fundo oceânico, que pode despoletar a produção de gás metano e monóxido de azoto neutralizando assim o efeito benéfico da fixação do carbono [112] [109] [113].

Não existe um limite físico para a quantidade de CO₂ antropogénico que pode ser armazenado nos oceanos. No entanto, de acordo com o IPCC, para estabilizações das concentrações atmosféricas de CO₂ entre 350-1000ppm, as quantidades de CO₂ residentes nos oceanos estariam entre 2000-12000 GtCO₂, isto sem contar com as injeções intencionais [114]. Um dos principais problemas à injeção excessiva de CO₂ nos oceanos é o impacto que isso terá nos organismos marinhos. Um ponto muito discutido é o aumento do pH dos oceanos, a sua alteração é virtualmente impercetível nas camadas mais profundas, no entanto, alguns ecossistemas marinhos mais sensíveis estão já a ser afetados pelas alterações químicas do oceano, como por exemplo os recifes de coral. Os fenómenos observados incluem taxas reduzidas de calcificação, reprodução, crescimento, e o aumento da mortandade ao longo do tempo [114].

Não são só os ecossistemas mais superficiais dos oceanos que são afetados, os ecossistemas das regiões mais profundas são muito estáveis e sensíveis a qualquer tipo de alteração por mais

pequena que ela seja. Se tivermos em conta que o CO₂ é um elemento raro nessas zonas, é de prever que os ecossistemas aí existentes também serão afetados pela injeção do mesmo. Por serem zonas cujo acesso humano é praticamente impossível, se não impossível de todo, é de notar que nenhuma experiência foi realizada nessas regiões para se poder saber de facto quais são as implicações da injeção de grandes quantidades de CO₂ na biota [113].

Esta é sem dúvida a forma mais económica de armazenamento de CO₂, mas é de entre todos os outros tipos de armazenamento conhecidos o que suscita menos aceitação. Não há ainda dados reunidos suficientes que nos permitam analisar de forma mais concisa e exata a verdadeira natureza dos impactos da injeção de grandes quantidades de CO₂ nos sedimentos do oceano profundo, nem que consequências isso trará para a fauna e flora dos nossos oceanos na globalidade. Existe um equilíbrio natural que prevalece à centena de milhares de anos, e não sabemos quais as consequências que uma alteração, por menor que ela seja, trará às nossas sociedades.

4.2.4.3 Armazenamento Biológico (Biofixação)

O armazenamento biológico consiste no sequestro de CO₂ através da fotossíntese por parte de organismos autotróficos fotossintéticos e vegetação terrestre. A sequestração biológica do carbono tem sido proposta como um método amigo do ambiente, o carbono da atmosfera é removido através da fixação deste como fonte de alimento no processo conhecido como fotossíntese. Este também é libertado como resultado da respiração celular e da decomposição da matéria orgânica por microrganismos (folhas e raízes mortas). As florestas, os campos agrícolas e as pastagens são grandes sumidouros de CO₂. A biomassa produzida tem inúmeras aplicações desde a produção de energia à geração bioquímica [112] [109] [101].

AGROFLORESTAL

É um método bastante promissor e atrativo para o sequestro de carbono em solos agrícolas pois consegue sequestrar quantidades significativas de carbono deixando a maior parte das terras para a produção agrícola. As taxas de sequestro de carbono mais elevadas são as dos sistemas agroflorestais complexos, pois apresentam uma grande variedade de espécies que utilizam os nichos ecológicos, desde a alta copa a andares de colheitas tolerantes a fraca luminosidade. Bons exemplos são cultivo à sombra de plantações de café e cacau, aqui as culturas de rendimento crescem debaixo da copa de árvores que sequestram o carbono e providenciam habitat para a vida selvagem [46].

A promoção destes sistemas pode se feita através dos projetos de CDM, ao criar sinergias entre a mitigação e a adaptação, e também por atender as exigências que os projetos CDM como benéficos

sociais e ambientais. Apesar deste seu potencial, estes sistemas ainda não foram reconhecidos como uma opção de mitigação de GEE para a agricultura mundial [46].

BIOMASSA AGRÍCOLA

Nos dias de hoje, as atividades agrícolas são responsáveis pela liberação de grandes quantidades de GEE, nomeadamente cerca de 5,1-6,1PgCO₂-eq (10-12%). Estas emissões são principalmente sobre a forma de metano (3,3PgCO₂-eq) pela decomposição de matéria orgânica, e óxido nitroso (2,8PgCO₂-eq) associada à utilização de fertilizantes, sendo que o fluxo líquido de carbono é muito pequeno (0,04PgCO₂-eq) [46].

Contudo, a agricultura apresenta um potencial de mitigação significativo para as alterações climáticas de 6PgCO₂-eq, práticas como agricultura biológica e agricultura de conservação podem fazer com a agricultura deixe de ser o segundo maior emissor de GEE do mundo. A agricultura biológica evita a utilização de fertilizantes, resultando em alimentos menos prejudiciais para a saúde humana, solos mais saudáveis e numa menor emissão de N₂O. Uma agricultura de conservação, através de plantio direto, rotação de culturas e cobertura orgânica permanente do solo, resulta em solos mais saudáveis, num maior sequestro de CO₂, diminuição de erosão e no uso reduzido de água e energia [46] [16]. Para além disto, a gestão de solo, culturas, nutrientes, animais, energia assim como incentivos à prática de uma agricultura ecológica e amiga do ambiente, são fatores de extrema importância para a redução de emissões de GEE e para um desenvolvimento sustentável [46].

FLORESTAS

As florestas são grandes sumidouros de CO₂, com uma área de cobertura de 3952 milhões de hectares apresentam atualmente uma taxa líquida de sequestro de carbono de aproximadamente 1,7+/-0,5 PgCano⁻¹. O aumento das taxas de sequestro de carbono por alteração da gestão florestal ou por alteração do padrão de consumo e utilização de produtos florestais, a substituição de combustíveis fósseis por biomassa florestal e o aumento da capacidade de sumidouro por reflorestação ou florestação, vão afetar a quantidade de CO₂ atmosférico [46].

O carbono é libertado para a atmosfera com o desaparecimento da vegetação, por meio de incêndios, queda de árvores ou decomposição de folhas e outros detritos. Nas plantas herbáceas, a biomassa que se encontra acima do solo morre anualmente e começa a decompor-se imediatamente, mas para as plantas lenhosas, parte da biomassa acima do solo continua a armazenar carbono até à morte e decomposição da planta. Esta é a essência do ciclo de carbono nas florestas com acumulo líquido de carbono, através do crescimento vegetativo e liberação de

carbono com a morte da vegetação. O carbono também é sequestrado pelos solos florestais, este depende do teor de matéria orgânica do solo, da vegetação parcialmente decomposta à superfície e nas camadas mais superficiais do solo. À superfície dos solos o carbono acumula-se à medida que a vegetação morta é decomposta por organismos, o carbono é injetado nas camadas mais superficiais através de raízes. O carbono dos solos é libertado para a atmosfera através da decomposição da vegetação. Deste modo, os ecossistemas de grande biomassa e com solos pouco perturbados, como é o caso das florestas, retêm o carbono numa escala temporal muito maior, na ordem de décadas e séculos.

Uma boa gestão florestal está assim intrinsecamente ligada à mitigação do CO₂. Esta por ser feita através de uma gestão de conservação de carbono, de uma gestão do armazenamento de carbono e de uma gestão de substituição de carbono. A gestão de conservação tem como objetivo a conservação dos reservatórios de carbono que nos solos florestais, a gestão de armazenamento consiste numa expansão de armazenamento de carbono nos ecossistemas florestais através do aumento das suas áreas e/ou biomassa, por fim a gestão de substituição pretende o aumento de transferência do carbono da biomassa florestal em produtos, como por exemplo biocombustíveis [46].

MICROALGAS

A captura de CO₂ como fonte de carbono para o cultivo de microalgas tem tido uma atenção cada vez maior, uma vez que esta é uma tecnologia promissora para a mitigação das emissões de GEE.

As microalgas são microrganismos celulares de crescimento rápido, que através do processo de fotossíntese absorvem o CO₂ para as suas células para suportar o seu crescimento ao converterem o carbono em hidratos de carbono, por sua vez esses hidratos de carbono são utilizados na construção de proteínas, ácidos nucleicos e lípidos. Devido à sua elevada taxa de crescimento espera-se que as microalgas apresentem eficiências de biofixação 10-15 vezes mais elevadas que as plantas terrestres [115] [116] [117].

O cultivo de microalgas pode ser feito através de lagoas *Raceway* ou Fotobioreactores, ambos amplamente estudados e com aplicações a uma escala industrial (Figura 34). Os fotobioreactores apesar de serem tecnologicamente mais dispendiosos são os que apresentam taxas de crescimento celular mais elevadas, o controlo das características do meio em que as microalgas crescem é muito mais fácil, não existe quase nenhum tipo de contaminação, requerem menos espaço e existe uma menor perda de água para a atmosfera, sendo por isso os mais adequados para o cultivo de microalgas a uma escala industrial [115] [112].

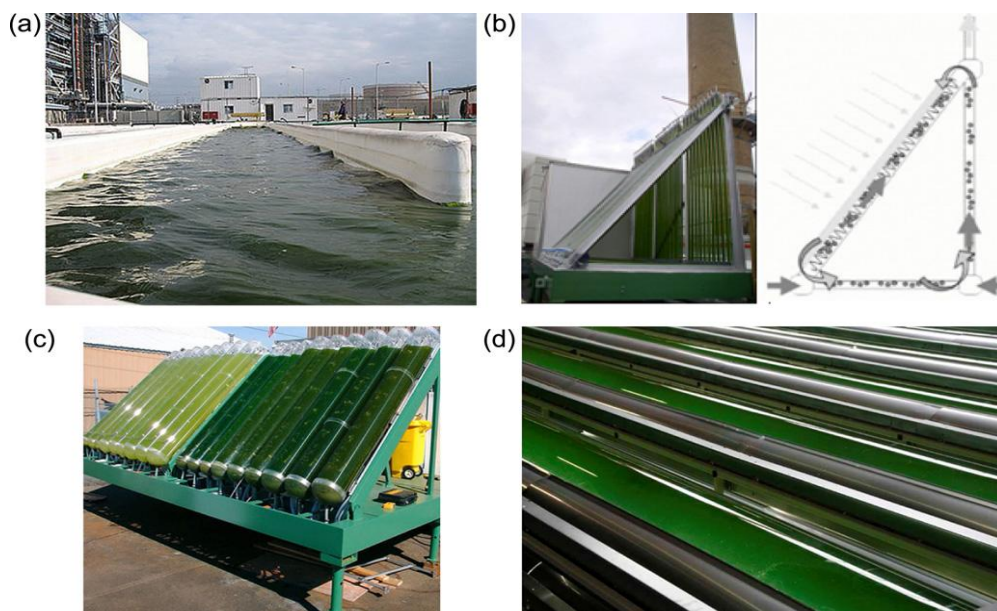


Figura 4.9: Configuração de reatores para o cultivo de microalgas: a) lagoas *raceway*; b) reator *air-lift*; c) reator de coluna de bolhas; d) reator tubular horizontal. Fonte: [115].

Os estudos que têm sido feitos para a remoção de CO_2 através das microalgas incluem a captura de CO_2 dos gases de combustão (10%-20% de CO_2) e a captura de CO_2 de espaços fechados (menos de 1% de CO_2), sendo necessário ter em conta várias variáveis que podem influenciar o cultivo das microalgas, tais como a distribuição de luz e saturação, temperatura, pH, salinidade, quantidade de nutrientes, concentração de O_2 dissolvido, e presença de elementos tóxicos como os metais pesados [118] [115].

Vários testes foram feitos em laboratório para uma avaliação do comportamento microalgal através da adição de diferentes concentrações de CO_2 a fotobioreactores, uma vez que a concentração de CO_2 é um parâmetro muito importante para a fotossíntese. Os resultados mostram um efeito positivo de crescimento microalgal com CO_2 puro, com gás de combustão real ou simulado para a taxa de fixação de carbono e produtividade de biomassa, que elevadas concentrações aumentam a transferência em massa de CO_2 a partir dos gases de mistura, mas a consequente redução do pH inibe o crescimento de algumas espécies de microalgas [115] [119] [120] [117].

De acordo com a literatura corrente, a captura de CO_2 através da utilização de microalgas é uma tecnologia promissora, e uma solução com enorme potencial para o problema atual do aumento das concentrações de GEE na atmosfera. As tecnologias CAC requerem energia para a captura, transporte e armazenamento de CO_2 , logo a captura de CO_2 através de microalgas apresenta custos elevados, contudo estes podem ser minimizados pelos benefícios do processo, nomeadamente a conversão de CO_2 em biomassa e a produção de produtos valiosos. Vários autores consideram ainda que a combinação da fixação de CO_2 , o tratamento de efluentes gasosos e águas residuais e a produção de biodiesel, tudo conseguido com o cultivo de microalgas, fornece uma alternativa

bastante promissora para tornar o processo de captura de CO₂ economicamente competitivo e viável [112] [119] [118] [115] [116] [117].

4.3 Aplicações das Tecnologias de CAC

4.3.1 Projetos CAC

Desde o *Hokkaido Toyako Summit* 2008, que se tem feito um progresso significativo fase às recomendações propostas pelos líderes G8 sobre o desenvolvimento, demonstração e implementação das CAC. Contudo, continua a ser necessária uma liderança política nacional e internacional para se conseguir atingir os objetivos dos G8 para uma ampla implementação de CAC até 2020 [121]. É necessário manter as CAC nas grandes agendas de energia e nas mesas de discussão sobre as alterações climáticas, tais como G8, G20 e Fórum das Principais Economias (MEF), e também relatar o progresso do desenvolvimento e implementação das CAC [122] [121].

A existente colaboração entre os governos e a indústria proporcionou até à data [121]:

- 80 Grandes projetos CAC de escala industrial em vários estágios de desenvolvimento
- Mais de 26 bilhões de dólares em apoios governamentais para o desenvolvimento de projetos CAC a uma vasta escala
- Compromissos governamentais para o lançamento de 19 a 43 projetos de grande escala
- Novo projeto e prosseguimento para a construção

Atualmente existem cinco grandes projetos CAC totalmente integrados e a operar a uma grande escala comercial, eles são: *Sleipner*, *InSalah*, *Snohvit*, *Rangely* e *Weyburn-Midale*. Quatro desses projetos, nomeadamente *Sleipner*, *InSalah*, *Snohvit* e *Rangely*, fazem a injeção de CO₂ a partir de uma instalação de produção de gás natural, onde o CO₂ é separado do gás natural enviado para o mercado. Nos projetos *Sleipner*, *InSalah* e *Snohvit*, o CO₂ é injetado em aquíferos salinos, enquanto o projeto *Rangely* é utilizado para EOR. Por sua vez, o projeto *Weyburn-Midale* captura o CO₂ da *Central Great Plains Synfuels* e transporta-o para a utilização EOR [123] [121].

De acordo com o relatório IEA *Technology Roadmap CCS*, é necessária a implementação de aproximadamente 100 projetos até 2020, 850 projetos até 2030 e 3400 projetos até 2050, de modo a se conseguir alcançar as metas estabelecidas. Por outro lado, enquanto se dá o desenvolvimento das CAC nos países industrializados, espera-se que a partir de 2020 a transferência destas tecnologias para os países em desenvolvimento seja rápida. Estima-se também que a quantidade de CO₂ capturado nos países não-OCED corresponda a 50% em 2020, aumentando para 65% em 2050 (Figura 35) [124] [121].

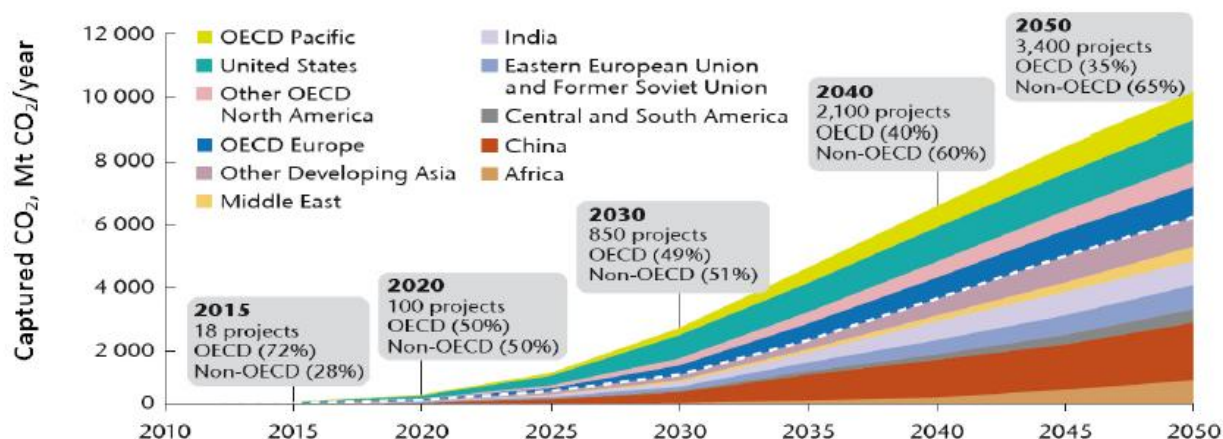


Figura 4.10: Desenvolvimento Global CAC de 2010-2050 por região. Fonte: [124] [121].

A Europa encontra-se em primeiro lugar no que diz respeito ao uso das tecnologias CAC, existem vários projetos com diferentes dimensões que foram iniciados nos últimos 20 anos. A iniciativa industrial de CAC europeia tem como principal objetivo a demonstração da viabilidade económica destas tecnologias com base no comércio de emissões e a permissão da sua implementação em centrais termoelétricas a carvão, no período de 2020 a 2050 [125].

O financiamento para os projetos está disponível através do Programa da Comissão NER300, que se encontra por sua vez ligado ao regulamento de comércio de emissões da Europa, o financiamento também é disponibilizado pela despesa europeia de estímulo económico (EERP) e por países individualmente [123] [10].

O Reino Unido e a Holanda apresentam o maior número de Projetos CAC na Europa, mas é a Noruega que oferece um maior avanço relativamente ao armazenamento de CO₂, com projetos como *Sleipner* e *Snøvit* com uma capacidade de armazenamento total de 1,7 milhões de toneladas por ano de CO₂, através do processamento de gás natural [123] [10]. Vários projetos CAC também estão em curso na Alemanha, Espanha, Itália, Polónia e Roménia.

Os respetivos projetos são [10]:

- Projeto Compostela OxyCFB300, em Espanha
- Projeto da Central elétrica de energia verde Sargassos, em Malta (*Sargassos Green Power Plant*)
- Projeto Porto Tolle, em Itália
- Projeto da Central Termoelétrica CAC Maritsa, na Bulgária
- Projeto de Demonstração CAC Getica, na Roménia
- Projeto ULCOS, em França
- Projeto *Green Hydrogen*, na Holanda

- Projeto *Don Valley*, no Reino Unido
- Projeto *C. Gen North Killingholme*, no Reino Unido
- Projeto *Teesside Low Carbon*, no Reino Unido
- Projeto *CAC White Rose*, no Reino Unido
- Projeto *Captain Clean Energy*, no Reino Unido
- Projeto *Mongstad*, na Noruega
- Projeto *Industrikraft More*, na Noruega
- Projeto *Sleipner*, na Noruega
- Projeto *Snohvit*, na Noruega

O Projeto *Sleipner* teve início em 1996, quando a *Statoil* Norueguesa iniciou a injeção de mais de 1 milhão de toneladas de CO₂ por ano, no Mar do Norte. O CO₂ é extraído juntamente com o gás natural do campo de gás *offshore* de *Sleipner*. Com o intuito de evitar pagar os impostos propostos pelo governo (55\$ por tonelada), a *Statoil* construiu uma plataforma *offshore* especial para a separação do CO₂ de outros gases. O CO₂ é de novo injetado aproximadamente 1000m abaixo do fundo do mar, na formação salina *Utsira*, situada perto do campo de gás natural. Estima-se que a formação apresente uma capacidade de 600 bilhões de toneladas de CO₂, e deverá continuar operacional mesmo após o cessamento da extração de gás natural de *Sleipner* [121] [10].

O Projeto *Snohvit* representa a primeira central de gás natural liquefeito (GNL) da Europa, a *Statoil* extrai o gás natural e o CO₂ a partir do campo de gás *offshore* *Snohvit* no Mar de Barents. Este canaliza a mistura a 160km da costa para o processamento na Central GNL perto de *Hammerfest*, aqui a separação de CO₂ é necessária para a produção de GNL, sendo que o projeto captura cerca de 700.000 toneladas de CO₂ por ano. Desde 2008 que o CO₂ capturado é canalizado de volta para a plataforma *offshore* onde é injetado na formação de arenitos *Tubåsen* a 2600m sob o fundo do mar e abaixo da formação geológica a partir do qual o gás natural é produzido [121] [10].

4.3.2 Estratégias Nacionais

Para o cumprimento dos objetivos nacionais, no âmbito do Protocolo de Quioto, foram definidos três instrumentos principais em Portugal, com o intuito de mitigação das emissões de GEE, no contexto da Estratégia Nacional para as Alterações Climáticas.

O Programa Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC), que consiste na redução das emissões de GEE ao nível setorial. O Plano Nacional de Atribuição de Licenças de Emissão (PNALE), que define a nível nacional as instalações abrangidas pelo Comércio Europeu de Licenças de Emissão (CELE), sendo que entre 2008 e 2012 sucedeu-se o primeiro período de cumprimento do Protocolo de Quioto (PNALEII). E o Fundo Português de Carbono (FPC), cujo objetivo é o financiamento de reduções de emissões de GEE, com medidas adicionais ao PNAC, a participação em mercados de

carbono e a cooperação internacional. Em 2010 foi aprovada a Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas, cujo principal objetivo são as respostas das vulnerabilidades nacionais aos impactos das alterações climáticas [126] [127].

Para um período pós 2012, foram criados novos instrumentos, como o Roteiro Nacional de Baixo Carbono (RNBC), com o intuito de estabelecer as políticas a seguir e as metas nacionais a atingir para as emissões de GEE, com base nos cenários projetados de GEE para 2030 e 2050, e o Programa Nacional para as Alterações Climáticas 2013-2020 (PNAC 2020), que deve estabelecer novas políticas, medidas e instrumentos com o objetivo de resposta à limitação de emissões de GEE para os sectores não cobertos pelo Comércio Europeu de Licenças de Emissão, previsão das responsabilidades sectoriais, o financiamento e os mecanismos de motorização e controlo [128] [129] [126].

Portugal reconhece 27 fontes com mais de 0,1Mt/ano de emissões de CO₂, nas quais podem ser implementadas as CAC, a grande maioria das fontes situa-se em zonas costeiras e inclui centrais termoelétricas a carvão e gás natural, refinarias, indústria de cimento, aço e vidro. O plano de implementação apresenta quatro objetivos, tais como o desenvolvimento de uma estratégia e capacidade de instalação de CAC em Portugal, a estimativa da capacidade de armazenamento e impactos ambientais nos ecossistemas marinhos, uma melhor eficiência das centrais termoelétricas e a viabilidade técnico-económica e o valor acrescentado de instalações com CAC [128] [129].

4.3.3 Projetos CAC em Portugal

Existem três empresas em Portugal responsáveis pela produção de energia, elas são a EDP, a Turbogás e a Tejo Energia. A EDP é responsável pelas Centrais Termoelétricas de Sines, Ribatejo, Setúbal, Barreiro, Mortágua e Tunes. A Turbogás gere a Central Termoelétrica da Tapada do Outeiro, que é responsável por cerca de 15%-20% das necessidades de energia elétrica em Portugal. Por último, a Tejo Energia gere a Central de Pego, que produz 11% da energia elétrica consumida em Portugal [130].

Atualmente em Portugal, o Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) é a única instituição nacional que faz parte do grupo de trabalho com organização a nível governamental para a implementação da Diretiva da UE para o armazenamento do CO₂, e com participação do primeiro projeto CAC em Portugal conhecido como K-Tejo [131].

PROJETO K-TEJO PARA CENTRAL TERMOELÉTRICA DO PEGO

A Central Termoelétrica de Pego situa-se no concelho de Abrantes, operando desde 1993 com uma potência instalada de 628MW, cujo combustível fóssil é o carvão com emissões anuais de CO₂ em cerca de 4Mton/ano de CO₂. A Tejo Energia, ao querer implementar na Central do Pego a

tecnologia CAC, visa contribuir para a estratégia traçada pela UE, e apoiada pelo Estado Português, de aumentar em 20% a produção energética através de fontes renováveis, aumentar em 20% a eficiência energética e reduzir em 20% as emissões de CO₂, até 2020 [132] [24].

O projeto K-Tejo visa estudar a viabilidade da aplicação da CAC em formações geológicas na Central Termoelétrica de Pego. Este é um Projeto em Co-Promoção ao abrigo do programa Quadro de Referência Estratégico Nacional (QREN), com duas fontes de financiamento, nomeadamente os próprios copromotores e os respetivos incentivos do QREN. A Tejo Energia lidera a equipa do projeto, que engloba a Pegop, a Universidade de Évora e o LNEG [133] [132].

Os principais objetivos da implementação da CAC na Central de Pego são minimizar os impactos ambientais da região inerentes ao funcionamento da central, reduzir em 85% as emissões de SO₂ e em 75% as emissões de NO_x, reduzir as partículas, e redução significativa dos volumes de CO₂ emitidos ao substituir em 10% o carvão por biomassa, o que permitirá reduzir cerca de 400 mil toneladas de CO₂ por ano [132].

Em 2009, a Tejo Energia iniciou a construção de duas novas instalações de Ciclo Combinado de gás natural (CCGT), que utiliza gás natural como combustível com uma capacidade de produção de 830MW. A tecnologia CAC está numa fase inicial de demonstração à escala industrial, no entanto, o tempo de vida expectável para a Central do Pego, considerando também a nova central de ciclo combinado, estende-se por algumas décadas. A avaliação atempada da possibilidade de aplicar a tecnologia CAC colocará a Tejo Energia em posição de recorrer à tecnologia, logo que o processo esteja disponível [134] [132].

O processo de captura de CO₂ na Central do Pego exige um *retrofitting* da Central, deste modo é essencial proceder a uma avaliação e seleção da tecnologia de captura que mais se adapta aos equipamentos existentes. Na Central do Pego podem ser aplicadas os sistemas de captura de pós-combustão e oxi-combustão, sendo que neste caso o que mais se adequa é o sistema de captura pós-combustão. A oxi-combustão requer modificações ao nível da caldeira e sistema de ar bastante significativas, por outro lado, ocorreria uma mudança na composição dos gases de combustão podendo resultar em efeitos prejudiciais aos materiais constituintes da caldeira dado que estes podem não resistir às elevadas temperaturas [133] [132] [134].

No Projeto K-Tejo, o CO₂ capturado vai ser transportado através de gasodutos, sendo necessária uma definição dos corredores mais favoráveis para a implementação do sistema de transporte. O respetivo armazenamento do CO₂ vai ser feito em aquíferos salinos adequados na Região do Pego, os locais de armazenamento geológico de CO₂ podem ser em formações *onshore* e *offshore* nacionais [133] [135] [132].

Este projeto originará a indicação da tecnologia de captura mais favorável, a caracterização das alterações técnicas a implementar na Central para se proceder ao seu *retrofitting*, a avaliação dos

custos envolvidos na implementação do sistema, a hierarquização das formações geológicas com maior potencial para armazenamento de CO₂ e a identificação das exigências e soluções de transporte do mesmo [133].

4.3.4 Oportunidades de Sequestro em Portugal

Portugal apresenta condições geográficas com potencial para a implementação de tecnologias de armazenamento de CO₂, ao longo de todo o país existem formações geológicas conhecidas como bacias sedimentares, que são potenciais locais de sequestro de CO₂ [136] [135].

Em Portugal, até à data, não se encontraram jazidas de petróleo para uma exploração rentável. Deste modo, o armazenamento de CO₂ em jazidas de petróleo encontra-se suspenso até que ocorra uma eventual descoberta que permita a injeção de CO₂ durante o processo de exploração. Têm sido realizadas várias sondagens na Bacia Lusitana, com o intuito de se atribuir concessões para a prospeção e exploração de petróleo em Portugal [136] [135].

As Bacias carboníferas, nomeadamente a Bacia do Douro, Bacia do Buçaco e a Bacia Santa Susana, apresentam condições adequadas para armazenamento de CO₂, uma vez que as explorações de carvão em Portugal encontram-se esgotadas [136] [137].

Em Portugal, o armazenamento de CO₂ em aquíferos salinos profundos é possível na Bacia do Porto, na Bacia do Algarve e na parte norte da Bacia Lusitana. Na Bacia do Porto existem dois reservatórios possíveis, os Arenitos de Torres Vedras com selante de intercalações de argilitos, *shale* e margas do Cretácico superior, e os Arenitos e Conglomerados do Triásico superior (Grés de Silves) com selante de margas e evaporitos, esta Bacia apresenta uma capacidade de armazenamento de 2004Mton [136] [135].

Na Bacia Lusitana, a zona de Torres Vedras e Grés de Silves apresentam condições adequadas por serem ambos sedimentos porosos, com uma camada impermeável composta de argila carbonatada e salgema, com uma capacidade de armazenamento de CO₂ de 3804Mton [136] [135].

Na Bacia do Algarve também existem dois reservatórios possíveis, as Areias do Miocénico com selante de argilas com capacidade de armazenamento de 662Mton, e os Arenitos e Calcários do Cretácico superior com selante de níveis intercalados de argilitos e margas e com capacidade de armazenamento de 1247Mton [136] [135].

ESTUDOS EM CURSO EM PORTUGAL

Têm sido efetuados testes piloto na Central Termoelétrica da Tapada do Outeiro no âmbito do projeto pioneiro de armazenamento de CO₂ nos carvões da Bacia Carbonífera do Douro (COSEQ), desenvolvidos pelo Centro de Investigação em Alterações Climáticas, Energia, Ambiente e

Bioenergia da Universidade Fernando Pessoa, liderado pelo Professor Manuel Lemos de Sousa [137].

Outro estudo em curso é processo de Difusão de gases em carvões com base isotérmica de *Langmuir*, conhecido como Projeto DIFUSÃO [137].

A 1 de Janeiro de 2010 foi iniciado o Projeto COMET, que pretende identificar e avaliar os custos de uma infraestrutura eficaz de transporte e armazenamento geológico de CO₂, assim como a localização, capacidade e potencial de armazenamento de CO₂ em formações geológicas na zona do mediterrâneo (Portugal, Marrocos e Espanha). Este teve uma duração de 3 anos, terminando no ano passado, e constitui um ótimo exemplo de um estudo de uma infraestrutura de transporte como parte de uma política de cooperação internacional [138]. Este projeto é coordenado pelo LNEG, envolvendo outras entidades, das quais as portuguesas Universidade de Évora – Centro de Geofísica, EDP, GALP, Tejo Energia [138].

5 CONCLUSÕES

A energia é o grande motor de todas as atividades humanas, é o que tem permitido este grande desenvolvimento económico e social nos últimos séculos, e é o que define as nossas sociedades. Sem energia não temos acesso às coisas que, nós, indivíduos de países desenvolvidos encaramos como dado adquirido e que grande parte da população mundial não tem acesso, como a água canalizada, a eletricidade nas nossas casas, o funcionamento de equipamentos dos quais nos encontramos dependentes (computadores, telemóveis, televisões, equipamentos domésticos, equipamentos indispensáveis na área da saúde, equipamentos relacionados com o sector da segurança, sector dos transportes, sector de indústrias, etc.).

Nos dias de hoje, a nossa principal fonte de energia tem por base a exploração dos combustíveis fósseis, é esta fonte primária de energia que tem até agora conseguido satisfazer as necessidades energéticas mundiais. Mas a crescente necessidade de energia e os consequentes impactes ambientais causados pela queima dessas fontes primárias energéticas (carvão, petróleo, gás natural) têm vindo a despertar uma consciência mundial de que é urgente mudar os nossos hábitos como cidadãos do mundo, que é urgente controlar o nosso consumo de energia e mitigar as nossas emissões de GEE, provenientes desse consumo.

A eficiência energética, a segurança energética e o acesso universal à energia, continuam a ser objetivos centrais na redução das emissões de GEE. Com o emergir das economias de países em desenvolvimento, principalmente China, Índia, Médio Oriente, a procura de energia pode duplicar ou até mesmo triplicar, durante as próximas décadas. Perante este facto, a energia e a sua utilização mais eficiente assume uma importância indiscutível na operacionalização do desenvolvimento sustentável, uma maior eficiência energética representa uma menor dependência de combustíveis fósseis importados e consequentemente uma maior segurança energética. É necessária a criação de estratégias e iniciativas a longo prazo com o intuito de melhorar o aproveitamento dos recursos energéticos e combater a pobreza energética nos países em desenvolvimento.

Grandes mudanças têm de acontecer na nossa sociedade para que consigamos estabelecer um caminho energético seguro, fiável e economicamente sustentável. É importante mudar a maneira de pensar dos consumidores finais, é necessário sensibilizar cada consumidor de que não é possível conciliar indeterminadamente o crescimento económico global tendencialmente contínuo com uma população global crescente com recursos naturais finitos. Assistimos a uma época de uma crise económica global e onde se agravam as desigualdades profundas de desenvolvimento. Contudo, é importante que se continue com o desenvolvimento da ciência, da tecnologia e da inovação como ferramenta imprescindível no combate às alterações globais, à deterioração do ambiente e para se conseguir uma utilização mais sustentável dos recursos naturais.

As alterações climáticas, em particular o aumento das emissões de GEE e o consequente aquecimento global, têm gerado discussão na comunidade científica relativamente ao facto de estas estarem ligadas ou não ao aumento da atividade humana ao longo deste século. Apesar de não se conseguir calcular com exatidão as concentrações de CO₂ emitidas para a atmosfera, não se pode por de parte o facto de estarmos a libertar concentrações elevadas de GEE para a atmosfera, e pensar que isso não trará consequências para o sistema climático não é sensato.

Em 2012, a queda das emissões por parte dos EUA e UE foram compensadas pelas emissões da China, aumentando as emissões mundiais para 31,6 bilhões de toneladas de CO₂, sendo que o limite para se manter o aumento da temperatura média global em 2°C, é de 44 bilhões de toneladas de CO₂ [139]. Perante este cenário, o combate às alterações climáticas e a mitigação das emissões de GEE têm sido alvo de uma crescente atenção governamental. Planos de mitigação para uma descarbonização do sector energético estão a ser discutidos e a sua implementação estudada.

As tecnologias CAC ganham assim destaque, sendo consideradas como a aposta mais adequada para diminuir as emissões de CO₂ ao mesmo tempo que a necessidade energética aumenta, sendo esta necessidade assistida pela queima de combustíveis fósseis em centrais termoeletricas. O grande desafio permanece em integrar estas tecnologias em projetos de grande escala. A UE, no âmbito do Plano Estratégico de Tecnologias para a Energia, pretende a aplicação comercial de tecnologias CAC a uma escala industrial e apresenta em diferentes países vários projetos CAC em variadas fases de desenvolvimento e demonstração, com o intuito também de avaliar os respetivos custos e benefícios, avaliar as formações geológicas e as tecnologias utilizadas.

Apesar deste esforço e do potencial das tecnologias de capital intensivo (CAC), os progressos no domínio das energias limpas têm sido muito lentos, é necessário ultrapassar os desafios ligados à tecnologia e aos custos, principalmente na fase de demonstração. O papel dos governos será determinante para um futuro com baixas emissões de carbono. Os governos devem acelerar a inovação energética e a investigação pública, o desenvolvimento e a demonstração, e ao mesmo tempo criar uma colaboração internacional com o mesmo objetivo, devem definir metas rigorosas e credíveis com o intuito de equilibrar os custos e os benefícios de uma economia de baixo carbono, devem definir incentivos claros para os consumidores, empresas e investidores, devem diminuir progressivamente os subsídios aos combustíveis fósseis para criar condições de igualdade permitindo assim tornar estas tecnologias competitivas, garantir um preço de energia justo pago pelos consumidores e fixar um custo significativo para o carbono.

É importante focar que a captura e o armazenamento de CO₂ devem ser vistos como uma medida de mitigação das emissões existentes, e não como uma solução para se poder prolongar a emissão contínua de GEE. Em países com economias emergentes, que utilizam maioritariamente fontes de energia primária como o carvão, o desenvolvimento e a implementação deste tipo de tecnologias

irá permitir que estes países se desenvolvam em conformidade com o seu rápido crescimento económico e industrial ao mesmo tempo que se combate o aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera.

Contudo, as tecnologias CAC são só uma medida entre várias outras medidas de mitigação. O recurso às energias renováveis e a promoção da utilização de biocombustíveis são um forte incentivo para a diminuição da utilização de combustíveis fósseis no sector energético, com estimativas de geração de eletricidade no mundo de 57% em 2050. Ainda temos um longo caminho a percorrer até que se consiga atingir um desenvolvimento energeticamente sustentável e economicamente viável, o sucesso dependerá em grande parte do funcionamento global do sistema energético e não somente do uso isolado de tecnologias.

6 NOVAS TECNOLOGIAS

Uma tecnologia inovadora que tem recebido alguma atenção por parte da comunidade científica é a captura de CO₂ diretamente do ar. O conceito em si é simples, consiste no desenvolvimento de estruturas capazes de canalizar e remover o CO₂ diretamente do ar em quantidades maciças, e preferencialmente a um baixo custo, cerca de \$100 por tonelada de CO₂. O CO₂ capturado pode então ser armazenado em reservatórios geológicos, ou vendido a empresas petrolíferas, que injetam o CO₂ em reservatórios de petróleo para reduzir a viscosidade do óleo permitindo assim uma extração mais fácil do mesmo [90].

A *Carbon Engineering*, uma empresa sediada em Calgary, Canadá, tem utilizado compostos químicos sólidos ou líquidos capazes de absorver o CO₂, técnica denominada por '*carbon dioxide scrubbing*'. O processo em si é simples e contínuo, o ar vai passar ao longo de uma solução aquosa de hidróxido (NaOH ou KOH) numa câmara purificadora ('contactor'), as moléculas de CO₂ vão reagir com essa solução dando origem a uma solução carbonatada. O carbonato sólido vai ser posteriormente enviado para um forno aquecido, alimentado a gás natural ou com uma fonte de energia renovável, onde é misturado com óxido de ferro e aquecido. O CO₂ libertado é então capturado, comprimido, limpo e enviado para um gasoduto. Os sólidos que sobram são enviados para um tanque de mistura, onde vão reagir com a água e produzir hidróxido que vai poder ser reutilizado no passo inicial do processo. A etapa de aquecimento vai gerar a energia necessária para o funcionamento da central (Figura 36) [90]. Este tipo de tecnologia já está a ser estudado para futuras implementações a escalas comerciais pela empresa *Carbon Engineering*.

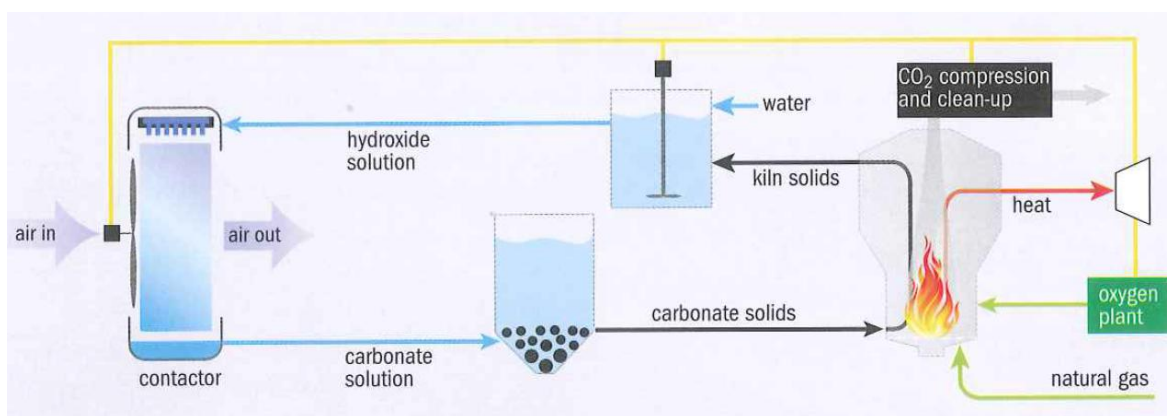


Figura 6.1: Captura de CO₂ diretamente do ar através de um processo químico denominado '*scrubbing*'. Fonte: [90].

Outra tecnologia inovadora, que tem sido estudada por Klaus Lackner, é a produção de árvores e folhas artificiais feitas de silicone ou polímeros, capazes de realizar o processo de fotossíntese e

funcionar como sumidouros de CO₂. As folhas desenvolvidas por Klaus Lackner são cerca de 1000 vezes mais eficientes na absorção do CO₂ comparativamente com folhas naturais, com a vantagem de que não precisam de estar expostas ao sol. Contudo, o seu desenvolvimento é caro, uma única árvore, que apresenta uma capacidade de absorver uma tonelada de CO₂ por dia, custa aproximadamente \$20.000 [90]. Apesar do seu valor elevado, a empresa de Klaus Lackner, *Kilimanjaro Energy*, tenciona desenvolver e comercializar esta tecnologia.

Os principais obstáculos à implementação destes projetos inovadores são a tecnologia utilizada e os custos associados à mesma. Contudo, investigação é feita diariamente para se melhorar estes desafios tecnológicos, e a nível económico todo e qualquer investimento feito terá retorno, a médio-longo prazo. O importante é conseguir visualizar o objetivo final, que é a necessidade de uma redução drástica de CO₂ atmosférico. Se for possível, através da utilização de todo um conjunto de tecnologias capturar o CO₂ atmosférico a uma velocidade superior à que existe na natureza, então a sociedade humana poderá conseguir estabilizar as emissões de CO₂ e alcançar deste modo um equilíbrio entre um crescimento económico e o consumo de energia, um desenvolvimento sustentável.

BIBLIOGRAFIA

- [1] W. H. Schlesinger, "Climate Change," *The Cary Institute of Ecosystems Studies*, pp. 1-14, 2011.
- [2] C2ES, "Climate Change 101: Understanding and Responding to Global Climate Change.," Pew Center on Global Climate Change, Arlington, V.A 22201, 2011.
- [3] IPCC, "Contributions of Working Groups I,II,III to the IPCC Fourth Assessment Report," Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- [4] W. L. Steffen, *Global Change and the Earth System: a Planet under Pressure*, New York: Springer, 2005.
- [5] S. VijayaVentakRaman, S. Iniyan e R. Goic, "A review of climate change, mitigation and adaptation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, pp. 878-897, 2012.
- [6] S. d. I. R. d. Can, "Global energy sources and trends," *Elsevier - Encyclopedia of Environmental Health*, pp. 987-994, 2011.
- [7] K. Narayanan e S. K. Sahu, "Energy Consumption Response to Climate Change under Globalization: Options for India," em *Institution, Structure and Organization in Globalizing India, with special focus on Science and Technology, Economy and Society*, Bombay, India, 2012.
- [8] IEA, "Wordl Energy Outlook," International Energy Agency, Paris, France, 2012.
- [9] IEA, "Energy Technology Perspectives, Pathways to a Clean Energy System," International Energy Agency, França, 2012b.
- [10] GLocalCCSIstitute, "CCS in Europe.," 2013. [Online]. Available: <http://globalccsinstitute.com/location/europe>. [Acedido em 8 Junho 2013].
- [11] B. Ausilio, "Future energy sources and systems - Acting on climate change and energy security," *Journal of Power Sources* 157, pp. 893-901, 2006.
- [12] V. Taseska, N. Markovska e J. M. Callaway, "Evaluation of climate change impacts on energy demand," *Elsevier - Energy* 48, pp. 88-95, 2012.
- [13] C. Hall, T. P., H. J., C. C. e J. J., "Hydrocarbons and the Evolution of Human Culture," *Nature* , pp. 318-322, 2004.
- [14] J. Sweeney, "Climate Change," *International Encyclopedia of Human Geography*, pp. 147-155, 2009.
- [15] IEA, "Wordl Energy Outlook," International Energy Agency, Paris, France, 2011.

- [16] FAO, “The state of food insecurity in the world,” Food and Agriculture Organization, United Nations, 2010.
- [17] R. Schaeffer, A. Salem Szklo, A. F. Pereira de Lucena, B. S. M. Cesar Borba, L. P. P. Nogueira, F. P. Fleming, A. Troccoli, M. Harrison e M. S. Boulahya, “Energy sector vulnerability to climate change: a review,” *Elsevier*, pp. 1-12, 2012.
- [18] B. Ansgar, D. Frauke e D. Christian, “Energy consumption and economic growth: News insights into the cointegration relationship,” *Energy Economics* 33, pp. 782-789, 2011.
- [19] U. F. Akpan e G. E. Akpan, “The Contribution of Energy Consumption To Climate Change: A Feasible Policy Direction,” *International Journal of Energy Economics and Policy*, pp. 21-33, 2012.
- [20] IEA, “World Energy Outlook,” International Energy Agency, Paris, France, 2010.
- [21] Eurostat, “Eurostat Statistical Books - The EU in the world 2013, A statistical portrait,” Informa Sarl, Luxembourg, Publications office of the European Union, 2012.
- [22] J. Bosch, F. X. Johnson, E. Clément, R. Mertens e N. Roubanis, Panorama of Energy, Energy statistics to support EU policies and solutions. Eurostat statistical books, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities: Eurostat, European Commission, 2009.
- [23] UE, “Limiting global climate change to 2°C,” 10 Janeiro 2007. [Online]. Available: http://www.europa.eu/rapid/press-release_MEMO-07-16_en.htm. [Acedido em 18 Março 2013].
- [24] UE, “Europa. Sínteses da Legislação da UE.,” 2010. [Online]. Available: http://europa.eu/legislation_summaries/environment/tackling_climate_change/128188_pt.htm. [Acedido em 13 Junho 2013].
- [25] Eurostat, Eurostat Pocketbooks. Energy, transport and environment indicators., Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011, 2012a.
- [26] EEA, “Annual European Union Greenhouse Gas Inventory 1990-2010 and Inventory report 2012,” 30 Maio 2012a. [Online]. Available: <http://www.eea.europa.eu/publications/european-union-greenhouse-gas-inventory-2012>. [Acedido em 14 Março 2013].
- [27] EEA, “Greenhouse gas emission trends in projections in Europe 2012- Tracking progress towards Kyoto and 2020 targets,” 24 Outubro 2012. [Online]. Available: <http://www.eea.europa.eu/publications/ghg-trends-and-projections-2012>. [Acedido em 14 Março 2013].
- [28] J. Houghton, Global Warming: The complete Briefing, Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [29] J. Clark, P. He, F. Marcott, S. Mix, A. Liu, Z. Otto-Bliesner, B. Schmitner e A. Bard, “Global Warming preceded by increasing carbon dioxide concentrations during the last

deglaciation,” *Nature* 484, pp. 49-55, 2012.

- [30] D. Archer e V. Brovkin, “The Millennial lifetime of fossil fuel CO₂,” *Climate Change vol.90*, pp. 283-297, 2008.
- [31] E.-G. Beck, “Evidence of variability of atmospheric CO₂ concentration during the 20th century,” *Postfach 1409*, 2008.
- [32] M. Eby, K. Zickfeld, A. Montenegro, D. Archer, K. Meissner e A. Weaver, “Lifetime of Anthropogenic Climate Change: Millennial Time Acales of Potencial CO₂ and Surface Temperature Perturbations,” *Journal of Climate vol. 22*, pp. 1-11, 2009.
- [33] F. D. Santos, Alterações Globais, Os desafios e os riscos presentes e futuros, Lisboa, Portugal: Fundação Francisco Manuel dos Santos, 2012.
- [34] M. Grubb, K. Mangino, C. R. Service e P. Saundry, “The Encyclopedia of Earth,” 7 Maio 2012. [Online]. Available: http://www.eoearth.org/article/kyoto_Protocol. [Acedido em 14 Março 2013].
- [35] A. Verbruggen, “A turbo drive for the global reduction of energy-related CO₂ emissions,” *Sustainability*, pp. 632-648, 2011.
- [36] L. C. Lau, K. T. Lee e A. R. Mohamed, “Global Warming mitigation and renewable energy policy development from the Kyoto Protocol to the Copenhagen Accord - A Comment,” *Renewable and Sustainable Energy vol.16*, pp. 5280-5284, 2012.
- [37] UNFCCC, “Kyoto Protocol,” UNFCCC, United States, 1998.
- [38] J. Ypersele, “Daily Kos,” 13 Novembro 2009. [Online]. Available: <http://www.dailykos.com/story/2009/12/13/813751/-climate-change-reality-1-5-or-2-degrees-celcius-Life-or-death-for-Tuvalu>. [Acedido em 14 Março 2013].
- [39] S. M. Rahman, A. Dinar e D. F. Larson, “Diffusion of Kyoto's Clean Development Mechanism,” *Technological Forecasting and Social Change vol.77*, pp. 1391-1400, 2010.
- [40] EPA, “Inventory of U.S. Greenhouse gas emissons and sinks: 1990-2011,” Fevereiro 2013. [Online]. Available: <http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/usinventoryreport.html>. [Acedido em 14 Março 2013].
- [41] CDIAC, “Carbon Dioxide Information Analysis Center,” 2010. [Online]. Available: http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/meth_reg.html. [Acedido em 14 Março 2013].
- [42] NEAA, “Netherlands Environmental Assessment Agency,” 7 Dezembro 2009. [Online]. Available: <http://www.pbl.nl/en/news/pressreleases/2009/meeting-the-2-degree-target>. [Acedido em 14 Março 2013].
- [43] J. Rogelj, C. Chen, J. Nabel, K. Macey, W. Hare, M. Schaeffer, K. Markmann, N. Hohne, K. K. Andersen e M. Meinshausen, “Analysis of the Copenhagen Accord - pledges and its goals climatic impacts, a snapshot of dissonant ambitions,” *Environmental Research Letters vol.5*,

pp. 1-9, 2010.

- [44] G. Solveig, W. Taoyuan e H. A. Knut, “Pledges for climate mitigation: the effects of the Copenhagen accord on CO2 emissions and mitigation costs,” *Springerlink*, pp. 1-17, 2012.
- [45] S. Vijayavenkataraman, S. Iniyan e R. Goic, “A review of Climate Change, Mitigation and Adaptation,” *Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 878-897, 2012.
- [46] R. Dhillon e G. Wuehlisch, “Mitigation of global warming through renewable biomass,” *Biomass and Energy* 48 , pp. 75-89, 2013.
- [47] G. A. Florides e P. Christodoulides, “Global Warming and carbon Dioxide through Science,” *Elsevier-Environment International* , pp. 1-12, 2009.
- [48] K. Ostermann, “Atmospheric modeling of carbon dioxide,” Faculty of Worcester Polytechnic Institute , Worcester, 2007.
- [49] J. Church, P. Woodworth, T. Aarup e W. Wilson, “Understanding sea-level rise and variability,” *London: Wiley-Blackwell*, p. 428, 2010.
- [50] D. Archer, P. Martin, B. Buffett, V. Brovkin, S. Rahmstorf e A. Ganopolski, “The importance of ocean temperature to global biogeochemistry,” *Earth Planet Sci. Lett.* vol. 222, pp. 333-348, 2004.
- [51] P. Nema, S. Nema e P. Roy, “An Overview of Global Climate Changing in current Scenarios and Mitigation action,” *Elsevier - Renewable and Sustainable Energy*, pp. 2329-2336, 2012.
- [52] F. Singer, “Nature not human activity rules the climate,” *The Hearthland Institute*, 2008.
- [53] R. W. Spencer, *Climate Confusion*, Encounter Books, 2008.
- [54] A. Roger e J. Pielke, “Misdefining 'climate change': consequences for science and action,” *Elsevier - Environmental Science & Policy*, pp. 548-561, 2005.
- [55] L. Bell, *Climate of Corruption, Politics and Power behind the Global Warming Hoax*, Austin, Texas: Greenleaf Book Group Press, 2011.
- [56] K. Brysse, N. Oneskes, J. O'Reilly e M. Oppenheimer, “Climate Change Prediction: erring on the side of least drama?,” *Elsevier - Global Environmental Change* 23, pp. 327-337, 2013.
- [57] R. M. Carter, “Knock, Knock: where is the evidence for dangerous human-caused global warming?,” *Economic Analysis&Policy* vol.38, no.2, 2008.
- [58] N. Ismail, *A Hot Tea by the Giza: The Real Global Warming, Not CO2 Hoax.*, New Yourk: iUniverse, Inc., 2010.
- [59] J. Shakun, P. Clark, F. He, S. Marcott, A. Mix, Z. Liu, B. Otto-Bliesner, A. Schmidtner e E. Bard, “Global Warming preceded by increasing carbon dioxide concentrations during tha last

deglaciation,” *Nature* vol.484, pp. 49-55, 2012.

- [60] J. Toggweiler e D. Lea, “Temperature differences between the hemispheres and ice age climate variability,” *Paleoceanography* 25, p. PA 2212, 2010.
- [61] M. Akorede, H. Hizam, M. Ab Kadir, I. Aris e S. Buba, “Mitigating the anthropogenic global warming in the electric power industry,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 2747-2761, 2012.
- [62] D. Archer, M. Eby, V. Brovkin, A. Ridgwell, L. Cao, U. Mikolajewicz, K. Caldeira, K. Matsumoto, G. Munhoven, A. Montenegro e K. Tokos, “Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel carbon Dioxide,” *Annual Review of Earth and Planetary Science* 37, pp. 117-34, 2009.
- [63] M. Ghommem, M. R. Hajj e I. K. Puri, “Influence of Natural and Anthropogenic carbon dioxide sequestration on Global Warming,” *Elsevier - Ecological Modelling*, pp. 1-7, 2012.
- [64] J. Hansen, R. Ruedy, M. Sato e K. Lo, “Global surface temperature change,” *Review Geophysics* 48 ID: RG4004, 2010.
- [65] J. Hansen, R. Ruedy, M. Sato e K. Lo, “GISS, Surface temperature Analysis,” 18 Janeiro 2012a. [Online]. Available: <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/2011/>. [Acedido em 23 Fevereiro 2013].
- [66] J. Hansen, M. Sato e R. Ruedy, “Global Temperature Update through 2012,” *GISS; Nasa*, pp. 1-7, 2012.
- [67] O. Humlum, K. Stordahl e J.-E. Solheimi, “The phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature,” *Elsevier - Global and Planetary change* 100, pp. 51-69, 2013.
- [68] A. Lacis, “GISS, Goddard Institute for Space Studies,” Outubro 2010. [Online]. Available: http://www.giss.nasa.gov/research/briefs/lacis_01/. [Acedido em 7 Março 2013].
- [69] H. Le Treut, S. R., C. U., D. Y., M. C., M. A., P. T. e P. M., “Historical Overview of Climate Change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis,” Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- [70] P. Moriarty e D. Honnery, “A Human needs approach to reducing atmospheric carbon,” *Elsevier - Energy policy* vol.38, pp. 695-700, 2010.
- [71] C. Naidu, K. Durgalakshmi, G. C. Satyanarayanna, L. M. Rao, S. V. Ramakrishma, J. R. Mohan e K. N. Ratna, “An Observational evidence of Climate change during Global Warming era,” *Elsevier - Global and Planetary Change*, pp. 11-19, 2011.
- [72] L. E. Rafelski, S. C. Piper e R. F. Keeling, “Climate effects on atmospheric carbon dioxide over the last century,” *Tellus - The International Meteorological Institue in Stockholm*, pp. 718-731, 2009.

- [73] C. Russil e Z. Nyssa, "The tipping point trends in climate change communication," *Elsevier - Global Environmental Change* 19, pp. 336-344, 2009.
- [74] W. Anderegg, J. Prall, J. Harold e S. Schneider, "Expert credibility in climate change," *Annual Reviews of Earth and Planetary sciences* 37, pp. 117-134, 2010.
- [75] A. A. Lacis e e. al., "Atmospheric CO₂: principal control knob Governing Earth's Temperature," *Science* 330, pp. 1-5, 2010a.
- [76] F. Meunier, "The Greenhouse effect: a new source of energy," *Elsevier - Applied Thermal Engineering* 27, pp. 658-664, 2007.
- [77] J. Grace, "Understanding and Managing the Global Carbon Cycle," *Journal of Ecology* vol. 42, pp. 189-202, 2004.
- [78] G. A. Olah, G. S. Prakash e A. Goeppert, "Anthropogenic Chemical Carbon Cycle for a Sustainable Future," *J. Am. Chem. Soc. vol. 133, no.33*, pp. 12881-12898, 2011.
- [79] A. Gavrilov, X. Romanovskii, V. Romanovsky, H. Hubberten e V. Tumskey, "Reconstruction of ice complex remnants on the eastern Siberian Arctic Shelf," *Permafrost. Periglac. Process. vol.14*, pp. 187-198, 2003.
- [80] D. Luthi, M. Le Floch, B. Beneiter, T. Blunier, J.-M. Barnola, U. Siegenthaler, D. Raynaud, J. Jouzel, H. Fischer, K. Kawamura e T. Stocker, "High-resolution carbon dioxide concentration record 650.000-800.000 years before present," *Nature* 453, pp. 379-382, 2008.
- [81] P. N. Pearson e M. Palmer, "Atmospheric Carbon Dioxide concentrations over the past 60 Million years," *Nature* vol.406, pp. 695-699, 2000.
- [82] NOAA, "NOAA National Climate Center, State of the climate," Dezembro 2012. [Online]. Available: <http://www.ncdc.noaa.gov/stoc/global/2012/13>. [Acedido em 14 Fevereiro 2013].
- [83] C. Vernon, E. Thompson e S. Cornell, "Carbon dioxide emission scenarios: limitations of the fossil fuel resource," *Elsevier - Procedia Environmental Sciences* 6, pp. 206-215, 2011.
- [84] Nasa, "GISS, Surface Temperature Analysis (GISTEMP)," 15 Janeiro 2013a. [Online]. Available: <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>. [Acedido em 23 Fevereiro 2013].
- [85] Nasa, "GISS, Surface Temperature Analysis," 11 Janeiro 2011a. [Online]. Available: <http://www.giss.nasa.gov/research/news/20110112/>. [Acedido em 23 Fevereiro 2013].
- [86] Nasa, "Giss, Surface Temperature analysis," 15 Janeiro 2013b. [Online]. Available: <http://www.giss.nasa.gov/research/news/20130115/>. [Acedido em 23 Fevereiro 2013].
- [87] Nasa, "GISS, Surface Temperature Analysis," 13 Janeiro 2011. [Online]. Available: <http://www.giss.nasa.gov/research/news/20110113/>. [Acedido em 23 Fevereiro 2013].
- [88] Nasa e Giss, "GISS, Surface Temperature Analysis," 13 Janeiro 2011. [Online]. Available:

<http://www.giss.nasa.gov/research/news/20110113/>. [Acedido em 23 Fevereiro 2013].

- [89] Nasa e Giss, “Giss, Surface Temperature analysis,” 15 Janeiro 2013. [Online]. Available: <http://www.giss.nasa.gov/research/news/20130115/>. [Acedido em 23 Fevereiro 2013].
- [90] D. Appell, “Capturing CO₂. Removing the Climate culprit from the air.,” *Physics World*, vol. 26, pp. 23-27, 2013.
- [91] C. Narayan, “Review of CO₂ emissions mitigation through prescribed burning,” EFI Technical Report 25, 2007.
- [92] IPCC, “Special Report on Emissions Scenarios,” Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- [93] F. Santos, *Que Futuro? Ciência, Tecnologia, Desenvolvimento e Ambiente*, Lisboa: Grávida, 2007.
- [94] ASME, “Technology and policy recommendations and goals for Reducing Carbon Dioxide Emissions in the Energy sector,” ASME, Washington, DC, USA, 2009.
- [95] K. Watkins, S. Kurukulasuriya, M. Mwangi e T. Scott, “Relatorio de Desenvolvimento Humano: Combater as alterações climáticas,” PNUD, New York, USA, 2008.
- [96] H. Lund e B. V. Mathiesen, “The role of Carbon Capture and Storage in a future sustainable energy system,” *Energy* 44, pp. 469-476, 2012.
- [97] ECF, “Roadmap 2050, A practical guide to a prosperous, low-carbon Europe, technical analysis, executive summary,” European Climate Foundation, The Hague, the Netherlands, 2010.
- [98] E. Blomen, C. Hendriks e F. Neele, “Capture technologies: Improvements and Promising Developments,” *Energy Procedia* 1, pp. 1505-1512, 2009.
- [99] N. Macdowell, N. Florin, A. Buchard, J. Hallet, A. Galindo, G. Jackson, C. Adjiman, C. Williams, N. Shah e P. Fennell, “An overview of CO₂ capture technologies,” *Energy & Environmental Science*, p. 25, 2010.
- [100] M. Mondal, H. Balsora e P. Varshney, “Progress and trends in CO₂ capture/separation technologies: A review,” *Energy* 46, pp. 431-441, 2012.
- [101] H. Yang, Z. Xu, M. Fan, R. Gupta, R. Slimane, A. Bland e I. Wright, “Progress in carbon dioxide separation and capture: A review,” *Environmental Science* 20, pp. 14-27, 2008.
- [102] M. Wang, A. Lawal, P. Stephenson, J. Sidders, C. Ramshaw e H. Yeung, “Post-combustion CO₂ Capture with Chemical Absorption: A State-of-the-art review,” *Process Systems Engineering Group, School of Engineering, Cranfield University, UK*, pp. 1-22, 2011.
- [103] G. Aydin, I. Karakurt e K. Aydiner, “Evaluation of geologic storage options of CO₂:

- Applicability, cost, storage capacity and safety,” *Energy Policy* 38, pp. 5072-5080, 2010.
- [104] J. Gibbins e H. Chalmers, “Carbon capture and storage,” *Energy Policy* 36, pp. 4317-4322, 2008.
- [105] ZEP, “The final report from working group I, Power plant and Carbon Dioxide Capture,” European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants, Paris, 2006.
- [106] T. Rufford, S. Smart, G. Watson, B. Graham, J. Boxall, J. Diniz da Costa e E. May, “The removal of CO₂ and N₂ from natural gas: A review of conventional and emerging process technologies,” *Journal of Petroleum Science and Engineering* 94-95, pp. 123-154, 2012.
- [107] D. Aaron e C. Tsouris, “Separation of CO₂ from Flue Gas: A review,” *Separation Science and Technology*, pp. 1-29, 2011.
- [108] A. Brunetti, F. Scura, G. Barbieri e E. Drioli, “Membrane technologies for CO₂ separation,” *Journal of Membrane Science* 359, pp. 115-125, 2010.
- [109] K. Sheps, M. Max, J. Osegovic, S. Tatro e L. Brazel, “A case for deep-ocean CO₂ sequestration,” *Energy Procedia* 1, pp. 4961-4968, 2009.
- [110] S. Bachu, D. Bonijoly, J. Bradshaw, R. Burruss, S. Holloway, N. Christensen e O. Mathiassen, “CO₂ Storage capacity estimation: Methodology and gaps,” *International Journal of Greenhouse gas Control* 1, pp. 430-443, 2007.
- [111] P. Goodwin, R. Williams, M. Follows e S. Dutkiewicz, “The ocean-atmosphere partitioning of anthropogenic carbon dioxide on centennial timescales,” *Global Biogeochem. Cycles* vol. 21, p. GB1014, 2007.
- [112] D. Farrelly, C. Everard, C. Fagan e K. McDonnell, “Carbon sequestration and the role of biological carbon mitigation: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21, pp. 712-727, 2013.
- [113] P. Israelsson, A. Chow e E. Adams, “An updated assessment of the acute impacts of ocean carbon sequestration by direct injection,” *Energy Procedia*, vol. 1, pp. 4929-4936, 2009.
- [114] IPCC, “IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage,” Cambridge University Press, New York, 2005.
- [115] J. Pires, M. Alvim-Ferraz, F. Martins e M. Simões, “Carbon dioxide capture from flue gases using microalgae: Engineering aspects and biorefinery concept,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 3043-3053, 2012.
- [116] M. Lam, K. Lee e A. Mohamed, “Current status and challenges on microalgae-based carbon capture,” *International Journal of Greenhouse Gas Control* 10, pp. 456-469, 2012.
- [117] R. Sayer, “Microalgae: The Potencial for Carbon Capture,” *Bioscience* vol.60, pp. 722-727, 2010.

- [118] A. T. Cervantes, M. Morales, E. Novelo e S. Revah, “Carbon dioxide fixation and lipid storage by *Scenedesmus obtusiusculus*,” *Bioresource Technology* , vol. 130, pp. 652-658, 2013.
- [119] S. Ho, C. Chen, D. Lee e J. Chang, “Perspectives on microalgal CO₂-emission mitigation systems - A review,” *Biotechnology Advances* , vol. 29, pp. 189-198, 2011.
- [120] E. Sydney, W. Sturm, J. de Carvalho, V. Thomaz-Soccol, C. Larroche, A. Pandey e S. Soccol, “Potencial carbon dioxide fixation by industrial important microalgae,” *Bioresource Technology*, vol. 101, pp. 5892-5896, 2010.
- [121] IEA e CSLF, “Carbon Capture and Storage - Progress and Next Steps. CSLF Report to the Muskoka 2010 G8 Summit,” International Energy Agency, Paris, 2010.
- [122] IEA, “Carbon Capture and Storage, Legal Regulatory Review,” International Energy Agency, Paris, France, 2012a.
- [123] IEA, “4th IEA International CCS Regulatory Network Meeting. Workshop Report.,” International Energy Agency , Paris, 2012c.
- [124] IEA, “CCS Technology Roadmap,” International Energy Agency, Paris, 2008.
- [125] EC, “European Commission. Climate Action,” 2010. [Online]. Available: http://ec.europa.eu/dgs/clima/mission/index_en.htm. [Acedido em 8 Junho 2013].
- [126] APA, “Agência Portuguesa Ambiente. Alterações Climáticas,” 2013a. [Online]. Available: <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=81>. [Acedido em 10 Junho 2013].
- [127] APA, “Ambiente,” 2013. [Online]. Available: <http://www.apambiente.pt>. [Acedido em 10 Junho 2013].
- [128] ERSE, “Comércio Europeu de Licenças de Emissão de Gases com efeito de estufa, Análise para Portugal no período 2005-2010.,” Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Lisboa, 2012.
- [129] CECAC, “Programa Comunitário NER300,” 2012. [Online]. Available: <http://www.clima.pt/ner300>. [Acedido em 10 Junho 2013].
- [130] EDP, “EDP Arquivo de Conteúdos,” 2012. [Online]. Available: http://www.a-nossa-energia.edp.pt/arquivo_conteudos/brochuras.php. [Acedido em 15 Junho 2013].
- [131] CSG, “Pan-European Cordination action on CO₂ geological storage,” 2013. [Online]. Available: <http://www.csgeurope.net/Partners.aspx?section=16>. [Acedido em 10 Junho 2013].
- [132] K-TEJO, “K-TEJO. Estudo da viabilidade da captura e armazenamento de CO₂ na Central Termoelétrica de Pego,” 8 Setembro 2010. [Online]. Available: <http://www.ktejo.cge.uevora.pt>. [Acedido em 13 Junho 2013].

- [133] M. S. Sardinha, *Captura de CO₂ na Central Termoeletrica a Carvão do Pego, no Contexto Energético Português.*, Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências. , 2010.
- [134] Tejo-Energia, “Tejo Energia,” 2010. [Online]. Available: <http://www.tejoenergia.com/index.asp?area=1>. [Acedido em 13 Junho 2013].
- [135] S. Machado, J. Sampaio, J. Carvalho, R. Dias, A. Costa e J. Oliveira, “Armazenamento de CO₂ em aquíferos salinos; hipóteses para Portugal. Seminário 'Carvão: um combustível fóssil na via da sustentabilidade?'.,” Lisboa, 2007.
- [136] J. Carneiro, “COMET, CO₂ Transport and Storage. 'Reservatórios Geológicos de CO₂ em Portugal: locais e características'.” Lisboa , 2012.
- [137] M. Sousa, C. Rodrigues e G. Oliveira, “Sequestração Geologica do dióxido de carbono: notas sobre o Estado-da-Arte.”, *Revista da Faculdade de Ciência e Tecnologia do Porto*, pp. 1-21, 2008.
- [138] LNEG, “LNEG. Projeto COMET,” 1 Janeiro 2010. [Online]. Available: www.lneg.pt/download/4492/FolhetoCOMET.pdf. [Acedido em 16 Junho 2013].
- [139] GlobalCCSIInstitute, “Global CCS Institute,” 2013a. [Online]. Available: <http://www.globalccsinstitute.com/institute/news/global-carbon-emission-hit-record-high-2012>. [Acedido em 23 Junho 2013].